

TAXONOMÍA DE LOS PROBLEMAS DE RUTEO DE VEHICULOS.



Universidad
Tecnológica
de Pereira

SEBASTIÁN GONZÁLEZ CASTAÑO

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PEREIRA**

2018

TAXONOMÍA DE LOS PROBLEMAS DE RUTEO EN INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES.

SEBASTIÁN GONZÁLEZ CASTAÑO

4'520.650

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Industrial.

Director

Ph.D. EN INGENIERÍA

ELIANA MIRLEDY TORO OCAMPO.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

PEREIRA

2018

TAXONOMÍA DE LOS PROBLEMAS DE RUTEO EN INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES.

RESUMEN.

Dada la importancia que tiene la cadena de suministros en el sector productivo y de consumo, se busca cada día mas implementar técnicas que ayuden a optimizar los tiempos de entrega, carga, descarga entre productores, centros de acopio, mayoristas y consumidores; esto aunado a la necesidad de acoplar la movilidad y el sector del transporte a las nuevas políticas ambientales; es por esto que, el problema de ruteo vehicular (VRP), supone el punto de partida para resolver esta temática con las diferentes restricciones propias de cada problema afrontado. El presente trabajo muestra una taxonomía del VRP producto de una revisión bibliográfica exhaustiva que analiza y da cuenta de las nuevas tendencias en materia de ruteo vehicular de los últimos años. Asimismo, este documento es de gran importancia para el sector académico al posibilitar nuevas líneas de investigación del VRP; por otra parte, busca generar impacto en la problemática de ruteo vehicular, generando alternativas heurísticas y meta-heurísticas descritas en este documento como método de resolución, ajustándose a las necesidades de movilidad de las empresas o centros urbanos.

Palabras clave.

VRP, ruteo vehicular, heurística, meta-heurística, algoritmo, genético, colonia de hormigas, agente viajero

GLOSARIO.

2E-VRP --- Two-Echelon Vehicle Routing Problem --- Problema de ruteo vehicular en dos niveles.

ACVRP --- Asymmetric capacitated VRP --- Problema de ruteo vehicular con capacidad asimétrica.

AMPL --- A Modeling Language for Mathematical Programming (Lenguaje de modelado para programación matemática).

ARP --- Arc Routing Problem --- Problema de ruteo de arco.

B --- Barreto instances for Location Routing Problem — Instancias propuestas por Barreto para el problema de localización y ruteo.

BB — Branch and Bound — algoritmo de Ramificación y acotamiento.

CARP — Capacitated arc routing problem — Problema de ruteo capacitado sobre arcos.

CFLP — Capacity Facility Location Problem — Problema de Localización de instalaciones con Restricciones de Capacidad

CLRP — Capacitated Location Routing Problem — Problema de Localización y Ruteo con Restricciones de Capacidad.

CLRPPC — Capacitated Location Routing Problem With Private Fleet And Common Carrier — Problema de Localización y Ruteo Considerando Flota Propia y Flota Subcontratada

COMVRP — Close-Open Vehicle Routing Problem — Problema de ruteo de vehículos combinado rutas abiertas y cerradas

CPMP — Capacitated P-median Problem — Problema Capacitado de la P-mediana

CVRP — Capacitated Vehicle Routing Problem — Problema de Ruteo de Vehículos Considerando Restricciones de Capacidad

DCVRP --- Distance-Constrained Capacitated Vehicle Routing Problem --- Problema de ruteo vehicular con restricción de capacidad y distancia.

DARP --- Dial-a-ride Problem --- Problema de marcar un viaje.

EGEI — Greenhouse gas emissions — Emisiones Gases de Efecto Invernadero

EVRP --- The Emissions Vehicle Routing problema --- Problema de ruteo vehicular con emisiones.

FLP — Facility Location Problem — Problema de localización de instalaciones

GCLRP — Green Capacitated Location Routing Problem — Problema de Localización y Ruteo Verde

GENI — Genealized insertions — Inserciones generalizadas

GENIUS — Genealized insertions unstringing stringing — Inserciones generalizadas considerando eliminación y reinserción del nodo

GOLRP — Green Capacitated Open Location Routing Problem — Problema de Localización y Ruteo Verde sin retorno al depósito

GSC — Green Supply chain — Cadena de suministro verde

GRASP — Greedy randomized adaptive search procedure — Procedimiento de úsqueda aleatoria golosa

GTS — Granular Tabu Search — Búsqueda Tabú Granular

GVRP — Generalized Vehicle Routing Problem — Problema de Ruteo generalizado.

LRP — Location Routing Problem — Problema de Localización

MCVRP --- Multiple capacity VRP --- Problema de ruteo vehicular con multiple capacidad.

MDOVRP — Multi-Depot Open Vehicle Routing Problem — Problema de Ruteo Abierto Considerando Múltiples Depósitos

MDVRP — Multi-Depot Vehicle Routing Problem — Problema de Ruteo de Vehículos con Múltiples Depósitos

MDVRPPC— Multi-Depot Vehicle Routing Problem With Private Fleet And Common Carrier — Problema de Ruteo de Vehículos Usando Múltiples Depósitos Considerando Flota Propia y Subcontratada

MOSS — Multi-objective Scatter Search — Optimización multi-objetivo con búsqueda dispersa

MOVPR --- multi-objective VRP --- Problema de ruteo vehicular multi objetivo.

M-TSP — Multiple Traveling Salesman Problem — Problema de múltiples agentes viajeros

M-TVRP --- Multi-Trip VRP --- Problema de ruteo vehicular con múltiples rutas.

MTZ — Miller Tucker Zemlin constraints — Restricciones de Miller Tucker Zemlin constraints

OLRP — Open Capacitated Location Routing Problem — Problema de Localización y Ruteo sin retorno al depósito

OVPR — Open Vehicle Routing Problem — Problema de Ruteo sin retorno al depósito

P — Perl instances for LRP — Casos propuestos por Perl para el LRP

POPMUSIC— Partial Optimization Metaheuristic Under Special Intensification — Algoritmo Metaheurístico de Optimización Parcial usando Intensificación Especial

PPW — Prins, Prodhon y Wolfer Calvo instances for LRP — Casos propuestos por Prins, Prodhon y Wolfer Calvo para el LRP

PR — Path Relinking — Encadenamiento de trayectorias

PRP — Pollution Routing Problem — Problema de Ruteo Considerando Polución

PVRP — Periodic Vehicle Routing Problem — Problema de Ruteo periódico

RECWA — Randomized Extended Clarke and Wright Algorithm — Algoritmo de Clarke y Wright aleatorio aumentado

RTDVRP --- Real Time Dynamic VRP --- Problema de ruteo vehicular con tiempo dinamico real.

SA — Simulated annealing — Recocido Simulado

SDVRP --- Split Delivery Vehicle Routing Problem --- Problema de ruteo vehicular con entrega dividida.

SR — String Relocation — Reubicación de cadenas

SSCFLP — Single Source Capacitated Facility Location Problem — Problema de localización de instalaciones de fuente única

TB — Tuzun and Burke instances for LRP — Casos propuestos por Tuzun y Burke para el LRP

SVRP --- Stochastic VRP --- Problema de ruteo vehicular estocástico.

TCVRP --- Capacitated VRP on trees --- Problema de ruteo vehicular con capacidad y sobre arboles.

TDVRP — Time dependent vehicle routing problem — Problema de ruteo considerando condiciones de tráfico

TS — Tabu Search — Algoritmo de Búsqueda Tabú

TSP — Traveling Salesman Problem — Problema del Agente Viajero

TTRP --- Truck and Trailer routing Problem --- Problema de ruteo vehicular con camión y remolque.

VNS — Variable Neighborhood Search — Búsqueda en vecindario variable

VRP — Vehicle Routing Problem — Problema de Ruteo de Vehículos

VRPB --- Vehicle routing problems with backhauls --- Problema de Ruteo de Vehículos con devoluciones.

VRPHF --- Vehicle routing problems with Heterogeneous Fleet --- Problema de ruteo vehicular con flota heterogénea.

VRPMTW --- Vehicle Routing Problem with multiple time Windows --- Problema de Ruteo de Vehículos con multiples ventanas de tiempo.

VRPPC — Vehicle Routing Problem With Private Fleet And Common Carrier — Problema de Ruteo de Vehículos Considerando Flota Propia y Subcontratada.

VRPPD --- VRP with Pick Up and Delivery --- Problema de ruteo vehicular con recogidas y entregas.

VRPTD --- Vehicle Routing Problem with time deadlines --- — Problema de Ruteo de Vehículos con plazos de tiempo.

VRPTW --- Vehicle Routing Problem with Time Windows --- problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo.

VSRP — Vehicle Routing Problem and Scheduling Problem — Problema de programación y ruteo de Vehículos

INDICE DE FIGURAS.

| | | |
|-----------|---|-----|
| Figura 1 | Grafico general del VRP, tomado de (Toro E. M., 2016). | 6. |
| Figura 2 | Documentos por año sobre VRP (Scopus, 2018). | 6. |
| Figura 3 | Documentos por autor para VRP, (Scopus., 11/7/2018). | 7. |
| Figura 4 | Documentos por país para VRP. (Scopus, 2018). | 7. |
| Figura 5 | Documentos por tipo para VRP. (Scopus, 2018). | 8. |
| Figura 6 | Taxonomía según métodos de solución. (Toro, Escobar, & Granada, 2016). | 9. |
| Figura 7 | Taxonomía para los métodos exactos de solución, tomada de (Rocha, 2011). | 10. |
| Figura 8 | Taxonomía para los métodos de solución mediante búsquedas en árbol, (Rocha, 2011). | 10. |
| Figura 9 | Taxonomía para los métodos de solución heurísticos, tomado de (Rocha, 2011). | 13. |
| Figura 10 | Taxonomía para los métodos de solución metaheurísticos, tomado de (Rocha, 2011). | 14. |
| Figura 11 | Modelos originarios del problema VRP. Tomado de (Rocha, 2011). | 18. |
| Figura 12 | Taxonomía para el VRP Homogéneo, tomado de (Rocha, 2011). | 19. |
| Figura 13 | Representación grafica para CVRP, tomado de (Konstantinidis, Savvas, & Char, 2014). | 20. |
| Figura 14 | Documentos por año para CVRP, (Scopus., 11/7/2018). | 20. |
| Figura 15 | Documentos por autor para CVRP, (Scopus., 11/7/2018). | 21. |
| Figura 16 | Representación gráfica para VRPTW, (Sripriya , Ramalingam , & Rajes, 2015). | 22. |
| Figura 17 | Representación gráfica para VRPTW, (Sripriya , Ramalingam , & Rajes, 2015). | 22. |
| Figura 18 | Documentos por año VRPTW (Scopus., 11/7/2018). | 23. |
| Figura 19 | Documentos por autor VRPTW (Scopus., 11/7/2018). | 23. |
| Figura 20 | Documentos por año para VRPTD (Scopus., 11/7/2018). | 24. |
| Figura 21 | Documentos por autor para VRPTD (Scopus., 11/7/2018). | 24. |
| Figura 22 | Documentos por año para VRPMTW (Scopus., 11/7/2018). | 25. |
| Figura 23 | Documentos por autor para VRPMTW (Scopus., 11/7/2018). | 25. |
| Figura 24 | Representación gráfica para VRPB. Tomado de (Toro E. M., 2016). | 27. |
| Figura 25 | Documentos por año para VRPB (Scopus., 11/7/2018). | 27. |
| Figura 26 | Documentos por autor para VRPB (Scopus., 11/7/2018). | 28. |
| Figura 27 | Representación gráfica para SDVRP. | 28. |
| Figura 28 | Documentos por año para SDVRP (Scopus., 11/7/2018). | 29. |
| Figura 29 | Documentos por autor para SDVRP (Scopus., 11/7/2018). | 29. |
| Figura 30 | Taxonomía para el VRP Heterogéneo (Rocha, 2011). | 30. |
| Figura 31 | Documentos por año para VRPHF (Scopus., 11/7/2018). | 31. |
| Figura 32 | Documentos por autor para VRP, (Scopus., 11/7/2018). | 31. |
| Figura 33 | documentos por año para PVRP (Scopus., 11/7/2018). | 32. |

| | |
|--|-----|
| Figura 34 Documentos por autor para PVRP (Scopus., 11/7/2018).. | 32. |
| Figura 35 Representación grafica para RTDVRP tomado de (Qili Zhu & Ong, 2000). | 33. |
| Figura 36 Documentos por año para RTDVRP (Scopus., 11/7/2018). | 33. |
| Figura 37 Documentos por autor para RTDVRP (Scopus., 11/7/2018). | 33. |
| Figura 38 Representación grafica para M-TVRP. (Despau, 2016). | 34. |
| Figura 39 Documentos por año para M-TVRP (Scopus., 11/7/2018). | 35. |
| Figura 40 Documentos por autor para M-TVRP (Scopus., 11/7/2018). | 35. |
| Figura 41 Representación grafica para MDVRP, tomado de (Toro E. M., 2016). | 36. |
| Figura 42 Documentos por año para MDVRP (Scopus., 11/7/2018). | 36. |
| Figura 43 Documentos por autor para MDVRP (Scopus., 11/7/2018). | 37. |
| Figura 44 Documentos por año par a MCVRP (Scopus., 11/7/2018). | 37. |
| Figura 45 Documentos por autor para MCVRP (Scopus., 11/7/2018). | 37. |
| Figura 46 Documentos por año para MOVPR (Scopus., 11/7/2018). | 38. |
| Figura 47 Documentos por autor para MOVPR (Scopus., 11/7/2018). | 38. |
| Figura 48 Cuadro sinóptico para SVRP Imagen tomada de (Sathyanarayanan & Suresh Joseph, 2014). | 39. |
| Figura 49 Documentos por año para SVRP (Scopus., 11/7/2018). | 40. |
| Figura 50 Documentos por autor para SVRP (Scopus., 11/7/2018).. | 40. |
| Figura 51 Representación grafica para el 2E-VRP, (Belgina, Karaoglanb, & Altiparmakc, 2016). | 42. |
| Figura 52 Documentos por año para 2E-VRP, (Scopus., 11/7/2018). | 42. |
| Figura 53 Documentos por autor para 2E-VRP (Scopus., 11/7/2018). | 43. |
| Figura 54 Representación grafica para (ACVRP), tomado de (Toro E. M., 2016). | 43. |
| Figura 55 Documentos por año para ACVRP, (Scopus., 11/7/2018).. | 44. |
| Figura 56 Documentos por autor para ACVR, (Scopus., 11/7/2018). | 44. |
| Figura 57 Representación grafica para ARP, figura tomada de (Amaya, 2007). | 45. |
| Figura 58 Documentos por año para ARP, (Scopus., 11/7/2018). | 45. |
| Figura 59 Documentos por autor para ARP, (Scopus., 11/7/2018). | 45. |
| Figura 60 Grafo ilustrativo del (DCVRP). | 46. |
| Figura 61 Documentos por año DCVRP (Scopus, 11/7/2018). | 47. |
| Figura 62 Documentos por autor para DCVRP (Scopus., 11/7/2018). | 47. |
| Figura 63 Representación grafica para DARP, tomada de (Cordeau J. a., 2003). | 48. |
| Figura 64 Documentos por año para DARP, (Scopus., 11/7/2018). | 48. |
| Figura 65 Documentos por autor para DARP, (Scopus., 11/7/2018). | 48. |
| Figura 66 Documentos por año para EVRP, (Scopus., 11/7/2018). | 49. |
| Figura 67 Documentos por autor para EVRP, (Scopus., 11/7/2018). | 49. |

| | |
|--|-----|
| Figura 68 Documentos por año para GVRP, (Scopus., 11/7/2018). | 50. |
| Figura 69 Documentos por autor para GVRP, (Scopus., 11/7/2018). | 50. |
| Figura 70 Documentos por año para LRP, (Scopus., 11/7/2018). | 51. |
| Figura 71 Documentos por autor para LRP, (Scopus., 11/7/2018). | 51. |
| Figura 72 Representación grafica para OVRP, imagen tomada de (Toro E. M., 2016).. | 52. |
| Figura 73 Documentos por año para OVRP, (Scopus., 11/7/2018). | 52. |
| Figura 74 Documentos por autor para OVRP, (Scopus., 11/7/2018). | 53. |
| Figura 75 Documentos por año para RTDVRP, (Scopus., 11/7/2018). | 53. |
| Figura 76 Documentos por autor para RTDVRP, (Scopus., 11/7/2018).. | 53. |
| Figura 77 Documentos por año para TDVRP, (Scopus., 11/7/2018). | 54. |
| Figura 78 Documentos por autor para TDVRP, (Scopus., 11/7/2018). | 54. |
| Figura 79 Representación grafica para TCVRP, ilustración tomada de (Chandran, 2007). | 55. |
| Figura 80 Documentos por año para TCVRP, (Scopus., 11/7/2018). | 55. |
| Figura 81 Documentos por autor para TCVRP, (Scopus., 11/7/2018). | 56. |
| Figura 82 Representación grafica para TTRP, tomado de (Chou, 2009). | 56. |
| Figura 83 Documentos por año para TTRP, (Scopus., 11/7/2018). | 57. |
| Figura 84 Documentos por autor para TTRP, (Scopus., 11/7/2018).. | 57. |
| Figura 85 Representacion grafica para VRPPD. (Sophie N. Parragh, 2006). | 58. |
| Figura 86 Documentos por año para VRPPD, (Scopus., 11/7/2018). | 58. |
| Figura 87 Documentos por autor para VRPPD, (Scopus., 11/7/2018). | 58. |
| Figura 88 Representacion grafica para VRPPC, tomado de (Toro E, 2016). | 59. |
| Figura 89 Documentos por año para VRPPC, (Scopus., 11/7/2018). | 59. |
| Figura 90 Documentos por autor para VRPPC, (Scopus., 11/7/2018). | 60. |
| Figura 91 Representación grafica para VSRP. Tomado de (Zhang, 2018). | 60. |
| Figura 92 Documentos por año para VSRP, (Scopus., 11/7/2018). | 60. |
| Figura 93 Documentos por autor para VSRP, (Scopus., 11/7/2018). | 61. |
| Figura 94 Representación grafica para (CLRP), tomado de (Toro E. M., 2016).. | 62. |
| Figura 95 Documentos por año para (CLRP), (Scopus., 11/7/2018). | 62. |
| Figura 96 Documentos por autor para (CLRP), (Scopus., 11/7/2018). | 62. |
| Figura 97 j no es un nodo terminal. (Toro E. M., 2016). | 68. |
| Figura 98 j es nodo terminal. (Toro E. M., 2016). | 68. |
| INDICE DE TABLAS. | |
| Tabla 1. Taxonomía según características del VRP. | 41. |
| Tabla 2. Resultados variantes VRP. | 69. |

CONTENIDO.

| | |
|--|-------------|
| RESUMEN. | III |
| GLOSARIO. | III |
| ÍNDICE DE FIGURAS. | VI |
| ÍNDICE DE TABLAS. | VIII |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN. | 1. |
| 1.1. Selección y definición del tema de investigación. | 1. |
| 1.1.1. Planteamiento del problema. | 1. |
| 1.1.2 Formulación del problema. | 2. |
| 1.1.3 Sistematización del problema. | 2. |
| 1.2. Objetivos. | 2. |
| 1.2.1 Objetivo general. | 2. |
| 1.2.2 Objetivos específicos. | 2. |
| 1.3. Justificación de la investigación. | 3. |
| CAPITULO 2. EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS (VRP) | 3. |
| 2.1. Formulación general del VRP. | 3. |
| 2.2. Estadísticas, bases de datos y documentos sobre el VRP en los últimos años. | 5. |
| 2.3. Técnicas de solución para problemas VRP. | 8. |
| 2.3.1. Técnicas exactas. | 10. |
| 2.3.2. Heurísticas. | 12. |
| 2.3.3. Metaheurísticas. | 13. |
| CAPÍTULO 3. TAXONOMÍA DE LOS PROBLEMAS DE RUTEO VEHICULAR (VRP). | 16. |
| 3.1. Introducción. | 16. |
| 3.2. Evolución Histórica según la Formulación de VRP. | 17. |
| 3.2.1. VRP Homogéneo. | 19. |
| 3.2.1.1. Principales variantes de los VRP homogéneos. | 20. |
| 3.2.2. VRP Heterogéneo. | 30. |
| 3.2.2.1. Principales variantes de los VRP heterogéneos. | 30. |
| CAPITULO 4. OTRAS VARIANTES DEL VRP. | 42. |
| RESULTADOS. | 69. |
| CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS. | 70 |
| BIBLIOGRAFIA. | 72. |

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1. SELECCIÓN Y DEFINICIÓN DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN:

El problema de enrutamiento o ruteo de vehículos (VRP, vehicle routing problem) data del año de 1959 y fue introducido por Dantzig y Ramser, quienes describieron una aplicación real de la entrega de gasolina a las estaciones de servicio y propusieron una formulación matemática (Arias, 2015). En las últimas décadas se ha aumentado la preocupación por determinar cuáles son las formas más eficientes de transportar cargas o personas de un lugar a otro, con el mínimo costo de combustible, desgaste e impacto al medio ambiente. Existen en la actualidad miles de estudios sobre ruteo de vehículos, todos ellos con variantes del VRP; es por eso que se encuentra la necesidad de caracterizar cada una de estas, clasificándolas en este documento para generar un estado del arte para los posteriores investigadores y que se tome esta referencia, con información clara y ordenada sobre los problemas de ruteo de vehículos, en adelante VRP, y sus variantes metaheurísticas. “Debido a que estos problemas son considerados difíciles de resolver y dentro de la optimización combinatoria son conocidos como problemas NP-Hard o de explosión combinatoria, pues no se obtiene una solución de manera eficiente; así mismo dentro de la teoría de la complejidad computacional pertenecen a la clase NP-Complejos, lo que indica que no se puede garantizar encontrar la mejor solución en un tiempo de cómputo razonable...” (Arias, 2015)

1.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Dada la gran cantidad de variantes que tienen los problemas de ruteo de vehículos VRP, se requiere realizar una actualización de dichas variantes, para generar un conocimiento que pueda ser utilizado por las siguientes generaciones de investigadores. Se pretende ser un punto de partida para implementar heurísticas y metaheurísticas que generen los procesos más eficientes, dependiendo de la ubicación geográfica y la cantidad de puntos de acopio y los respectivos clientes.

El panorama del VRP, está fundado en la necesidad que ha surgido en las ciudades en expansión de disminuir la congestión, el caos vehicular y la contaminación del medio ambiente (Corona, 2005); por otra parte, el sector privado ha venido interesándose en disminuir los tiempos de entrega, los costos de almacenaje y transporte y en gran medida propender, también, por el cuidado del medio ambiente. Es por esto que se ha venido trabajando fuertemente en dichos modelamientos y algoritmos para evitar los efectos de una mala planificación y logística urbana (Benjelloun, 2009)

En este trabajo se muestra un estado del arte del problema de ruteo de vehículos, enumerando sus variantes, modelos y metodologías de solución

1.1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

- ¿Cuáles son las variantes del problema de ruteo de vehículos?

1.1.3 SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

- ¿Cómo se identifican las diferentes variantes de VRP?
- ¿Qué herramientas se utilizan para resolver las variantes del VRP?

1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

- Realizar una revisión del estado del arte de los problemas de ruteo de vehículos (VRP) donde se presenten las diferentes variantes y aplicaciones, en concreto, las heurísticas y meta-heurísticas más extendidas dentro de este campo de investigación, para identificar líneas de investigación en pregrado y postgrado.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir las diferentes variantes del VRP, sus aplicaciones y topología.
- Identificar formulaciones de diferentes funciones objetivos.
- Describir estrategias de solución para las variantes del VRP.
- Identificar diferentes líneas de investigación, proponiendo mejoras, cambios y nuevas líneas de investigación con base a las potencialidades o dificultades encontradas en la realización de este trabajo.

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Este documento es de gran interés, tanto para la academia, el sector productivo y en determinado caso para las municipalidades y centros urbanos. Desde el punto de vista de la academia, es de gran ayuda puesto que puede llegar a ser el punto de partida para próximos proyectos al identificar nuevas líneas de investigación; al constituirse la taxonomía del VRP y sus variantes, servirá como base para los diferentes grupos de estudio y de investigación universitarios como material didáctico y de estudio.

En el sector productivo se busca generar impacto en la problemática de ruteo vehicular, generando alternativas heurísticas y meta heurísticas descritas en este documento como método de resolución, ajustándose a las necesidades de movilidad de cada empresa.

En el sector público puede llegar a ser un apoyo grande en cuanto a logística urbana y forma en la que se establecen los parámetros de movilidad en la ciudad, promoviendo una movilidad más limpia y amigable con el medio ambiente

CAPITULO 2. EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS (VRP)

2.1. FORMULACIÓN GENERAL DEL VRP

El primer problema planteado tipo VRP fue el del agente viajero o TSP (*Travelling Salesman Problem*) introducido por Flood en 1956. El problema recibe éste nombre porque puede describirse en términos de un agente vendedor que debe visitar cierta cantidad de ciudades en un solo viaje, de tal manera que inicie y termine su recorrido en la ciudad "origen"; el agente debe determinar cual ruta debe seguir para visitar cada ciudad una sola vez y regresar de tal manera que la distancia total recorrida sea mínima.

En la literatura científica, Dantzig y Ramser fueron los primeros autores en 1959, cuando estudiaron la aplicación real en la distribución de gasolina para estaciones de servicio. El problema de despacho de camiones "*Truck Dispatching Problem*" formulado en aquel documento puede ser considerado como una generalización del problema del agente viajero TSP "*Traveling-Salesman Problem*" (Rocha, 2011); en su forma más sencilla el TSP se preocupa por la determinación de la ruta más corta la cual pasa a través de cada uno de los n puntos dados, asumiendo que cada par de puntos está conectado por un arco, el número total de rutas a través de los n puntos es W_n . Aun para numeros pequeño de n , el número total de rutas es extremadamente grandes, por ejemplo, para $n=15$, existen $653.837'184.000$ rutas diferentes (Dantzig & Ramser, 1959);,el problema de TSP está catalogado como un problema N-P duro, lo que indica que el espacio de soluciones crece exponencialmente con el numero de n nodos. Por tanto, las estrategias

heurísticas y metaheurísticas se han usado ampliamente para obtener soluciones del problema en tiempos computacionalmente razonables (Rendón et al. 2015)

El problema puede formularse matemáticamente mediante programación lineal entera (PLE) Y La mayor parte de los problemas de ruteo de vehículos son generalizaciones del TSP. En ese sentido, puede considerarse el VRP más simple, (Daza, Montoya, & Narducci, 2009). El parque de vehículos en circulación cerró 2014 superando una nueva meta. En todo el mundo, hay ya más de 1.200 millones de vehículos en circulación, En 2017, último año con datos disponibles, el parque creció un 2.36%. (OICA, 2017), la patronal mundial del motor, lo que demuestra la importancia del VRP en el tema de movilidad; el uso de estas técnicas impactan positivamente la logística urbana, disminuyendo costos, tiempos y emisiones al medio ambiente. Se encuentra la primera referencia del TSP múltiple o m-TSP en 1960 con Miller, Tucker y Zemlin. Este problema es una generalización del TSP en la cual se tiene un depósito y m vehículos, es decir m agentes viajeros. El objetivo planteado es construir exactamente m rutas, una para cada vehículo, de modo que cada cliente sea visitado una vez por uno de los vehículos. Cada ruta debe comenzar y finalizar en el depósito y puede contener a lo sumo p clientes. En el problema m-TSP a cada cliente se le asocia una demanda y cada vehículo cuenta con cierta capacidad, razón por la que se concluye que el problema del agente viajero da origen al problema de ruteo (Toth & Vigo, 2002).

En 1969, a partir del trabajo de Tillman, se da origen al TSP probabilístico o PTSP. El objetivo de este problema es encontrar el mínimo costo de recorrido esperado a través de un conjunto de nodos con probabilidades asociadas a la presencia o no de consumidores que requieren ser servidos (Golden, Raghavan, & Wasil, 2008) .

Una vez enfatizado en la pertinencia que tiene el VRP para la logística urbana, se da paso al esquema general del problema de ruteo vehicular, asimismo, sus variantes y actualizaciones que se han hecho en ese campo, se da paso, entonces a estructurar la taxonomía para el problema de ruteo vehicular, sus orígenes y su evolución a través del tiempo y las diversas variantes que fueron surgiendo de acuerdo a las necesidades de movilidad; por otra parte se construye la taxonomía para la resolución de este problema, es decir las técnicas heurísticas , metaheurísticas y métodos exactos.

2.2 ESTADÍSTICAS, BASES DE DATOS Y DOCUMENTOS SOBRE EL VRP EN LOS ÚLTIMOS AÑOS.

A continuación se presenta el análisis de los estudios realizados en los últimos 18 años, es decir, lo correspondiente a los avances en materia de ruteo vehicular en el siglo XXI. La siguiente información es suministrada por el meta buscador *scopus*. Esta es una base de datos bibliográfica de resúmenes y citas de artículos de revistas científicas. Cubre aproximadamente 18.000 títulos de más de 5.000 editores internacionales, incluyendo la cobertura de 16.500 revistas revisadas por pares de las áreas de ciencias, tecnología, medicina y ciencias sociales, incluyendo artes y humanidades. Está editada por *Elsevier* y es accesible en la Web para los subscriptores. Las búsquedas en *Scopus* incorporan búsquedas de páginas web científicas mediante *Scirus*, también de *Elsevier*, y bases de datos de patentes (*elsevier*, 2004).

Se analizarán también los resultados del buscador nativo de *google*, “*google scholar*”, aunque este posee un espectro mucho más amplio de búsqueda, puesto que supone la referencias de los artículos encontrados como resultados de la búsqueda, lo que genera un ciclo exponencial de la búsqueda; sin embargo nos dará cuenta de la tendencia a nivel mundial de los estudios en este campo, objeto de estudio en la presente revisión.

Por otra parte, y como apoyo para nuestra revisión bibliográfica, se utilizaron bases de datos en las que la Universidad Tecnológica de Pereira se encuentra adscrita; para nuestro estudio, son: *IEEE explore*, *Science Direct*, *Engineering village*.

En adelante, cada una de las variantes de VRP presentes en este trabajo, tendrán, como complemento dichas gráficas y estadísticas para ilustrar mejor las tendencias actuales de dicha variante.

En los siguientes gráficos se muestra la tendencia que ha tenido el estudio del problema del ruteo vehicular en el nuevo milenio, se observa un crecimiento exponencial de este, a pesar de la disminución en los años comprendidos entre 2004-2005, 2010-2011 y 2014-2015

Esto muestra que es un tema de gran interés para la comunidad científica y en gran parte para el sector comercial, como se explicó en el marco teórico de la presente revisión. En nuestra entrada en la bases de datos *Scopus* para el problema de ruteo vehicular “vehicle routing problem”, se arrojan unos increíbles 9914 resultados (*Scopus*., 11/7/2018) todas estas búsquedas para captar las estadísticas y número de ejemplares, se realizaron en la semana comprendida entre el 4 y 10 de noviembre de 2018.

La figura 1 corresponde a la representación gráfica del problema de ruteo vehicular, con la idea de ilustrar al lector la topología del VRP y sus elementos, donde:

- Las flechas indican los arcos.
- Los círculos indican los nodos.
- Los rectángulos indican los depósitos o centros de distribución.

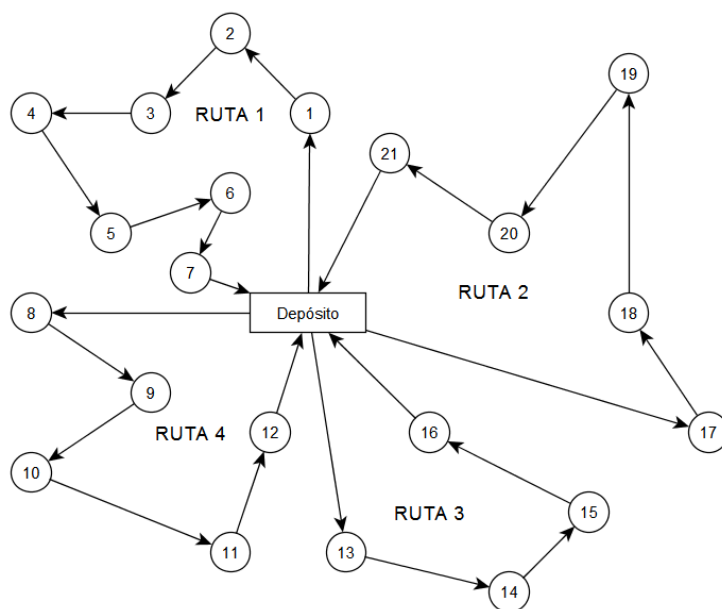


Figura 1. Grafico general del VRP, tomado de (Toro E. M., 2016)

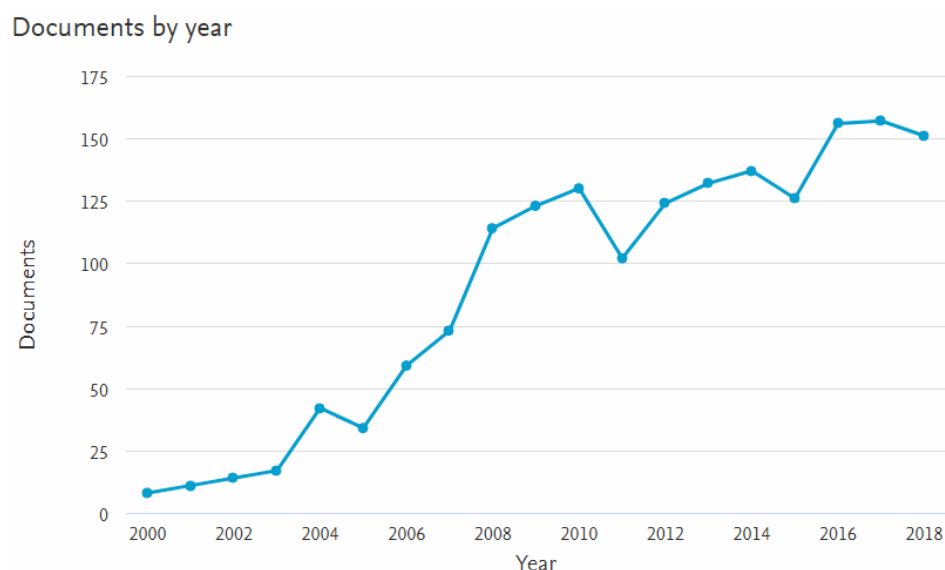


Figura 2. Documentos por año sobre VRP (Scopus., 11/7/2018)

Como se observa en la figura 2, hay un crecimiento exponencial en el estudio del problema de ruteo vehicular, lo que muestra la tendencia y la importancia de este t3pico para la comunidad academica a nivel mundial; por otra parte el interes de los centros urbanos y logisticos, pues es un tema que los impacta directamente, tanto en aspectos de costos y presupuestos como en emisiones y movilidad urbana.

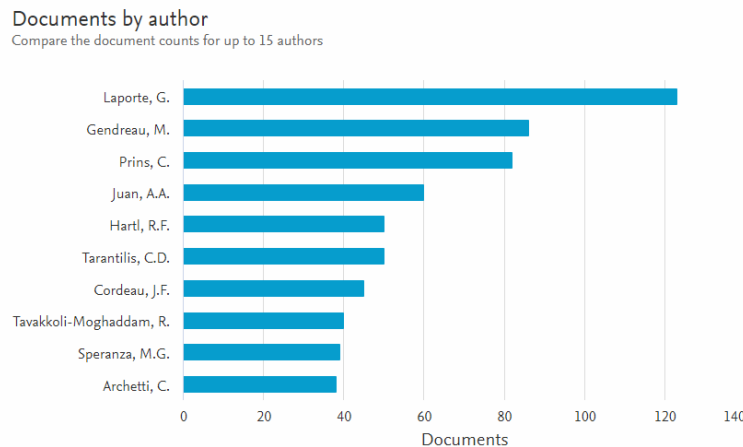


Figura 3. Documentos por autor para VRP, (Scopus., 11/7/2018)

Como observamos en la grafica 3, el profesor adscrito a la universidad HEC de Montreal, Canad3, Gilbert Laporte, es quien ostenta mayores estudios en la materia, profesor titular en dicha instituci3n; M.A.(Operational Research), Lancaster y Ph.D.(Operational Research), London School of Economics. Y mencionado en constantes ocasiones en este trabajo de revisi3n.

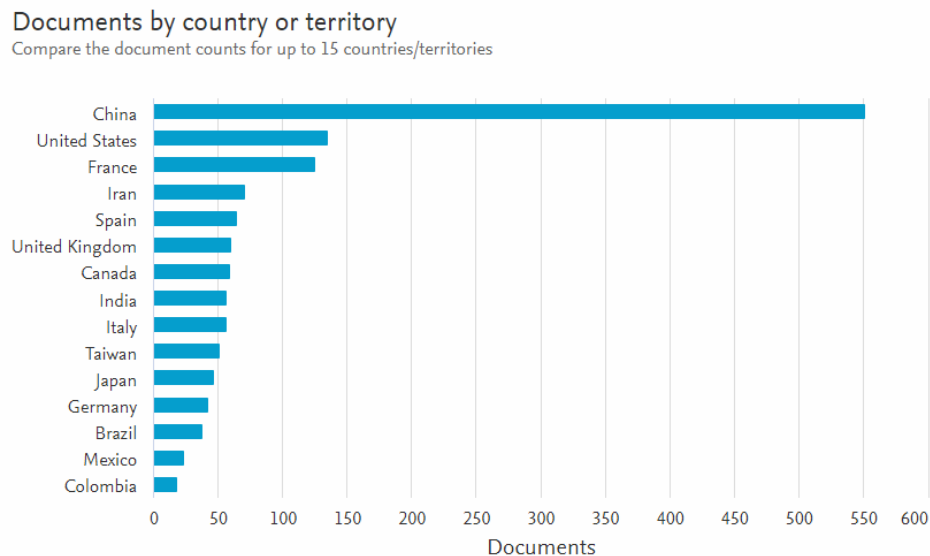


Figura 4. Documentos por pa3s para VRP. (Scopus., 11/7/2018)

En esta categoría, el ruteo vehicular ocupa un gran renglón para china, como muestra la figura 4. Con 551 artículos en *Scopus*. Esto nos dice que china es una de las naciones que mantiene su preocupación en cuanto a esta temática, dado su crecimiento en el área de logística y transporte de mercancías anivel nacional y mundial.

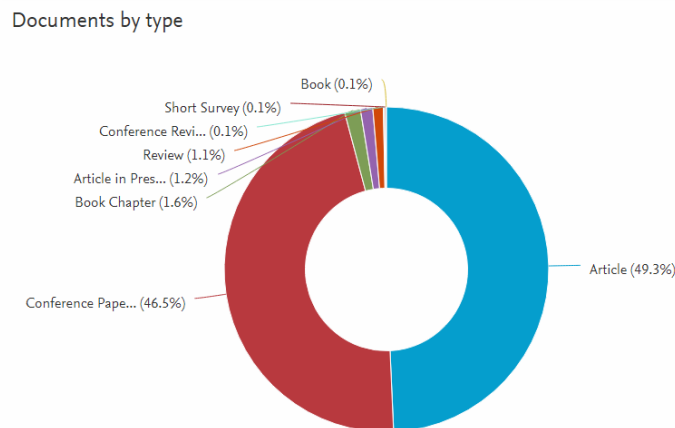


Figura 5. Documentos por tipo para VRP. (Scopus., 11/7/2018)

La figura 5. Da cuenta de que la mayoría de los estudios en cuanto a VRP y sus variantes son artículos y documentos de conferencia, esto nos dice algo muy importante y es la especialización en cada una de las variantes de este problema en investigación de operaciones, es decir, la tendencia son los estudios especializados en tópicos individuales del VRP y no grandes tratados y compilados que pueden, en determinado caso, alargar el proceso de conocimiento.

2.3. TÉCNICAS DE SOLUCIÓN PARA PROBLEMAS VRP

Debido al interés y complejidad del problema han sido muchas las técnicas de solución desarrolladas para resolver el CVRP, las cuales pueden ser adaptadas para resolver diferentes variantes del VRP. Estas técnicas son divididas en cuatro categorías básicas: técnicas exactas, heurísticas, metaheurísticas y matheurísticas, tal como se ilustra en la figura 6. (Toro, Escobar, & Granada, 2016), El problema del VRP en sus diferentes variantes ha sido abordado inicialmente usando técnicas exactas. (Laporte & Nohbert, 1987), se presenta un resumen de algoritmos exactos; en (Araque, Hall, & Magnanti, 1990) se presentan un modelo exacto a través de poliedros. En (Fischetti, Toth, & Vigo,

1994), se plantea una modificación al algoritmo de ramificación y acotamiento; (Naddef & Rinaldi, 2002) proponen un algoritmo de Ramificación y cortes; en (Baldacci et al. 2004) presentan un algoritmo exacto basado en la formulación por conjuntos con cortes adicionales; finalmente (Baldacci et al. 2011) plantean estrategias de relajación y generación de columnas

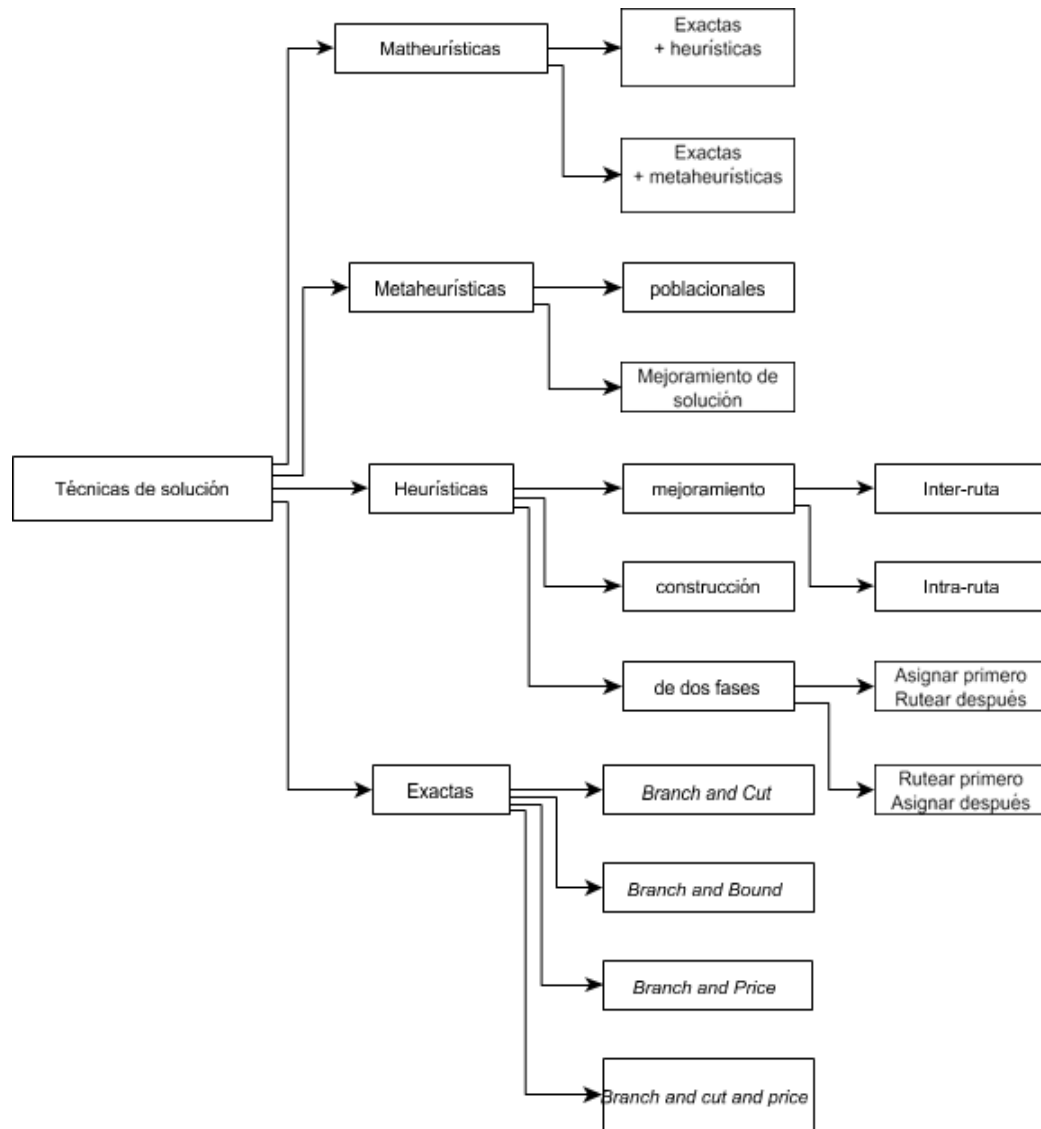


Figura 6. Taxonomía según métodos de solución. (Toro, Escobar, & Granada, 2016)

2.3.1. TÉCNICAS EXACTAS.

Son aquellos algoritmos que producen una solución óptima, estas técnicas no son eficientes en problemas de tipo NP-hard o NP-completas, las cuales son usuales en el VRP, pues esta utiliza un método de resolución en instancias de problema pequeños y su tiempo de resolución computacional es muy extenso (Daza, 2009). Los métodos exactos son eficientes en problemas de hasta 50 depósitos debido a restricciones de tiempo computacional (Azi, Gendreau, & Potvin, 2010). Los métodos exactos se pueden clasificar en tres grupos: búsqueda directa de árbol, programación dinámica, programación lineal y entera. (Rocha, 2011) En la Figura 7 se muestra esta clasificación (Laporte G. , 1991)

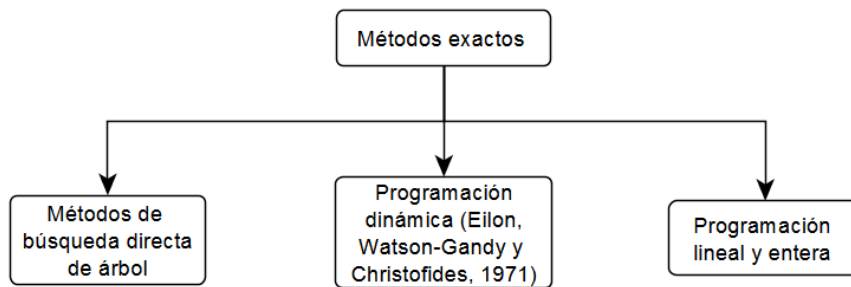


Figura 7. Taxonomía para los métodos exactos de solución, tomada de (Rocha, 2011)

MÉTODOS DE BÚSQUEDA DIRECTA DE ÁRBOL: La búsqueda se realiza sobre todos los nodos de un árbol de acuerdo a criterios específicos propios de cada método. La Figura 8, muestra la clasificación establecida a partir de (Laporte G. , 1991).

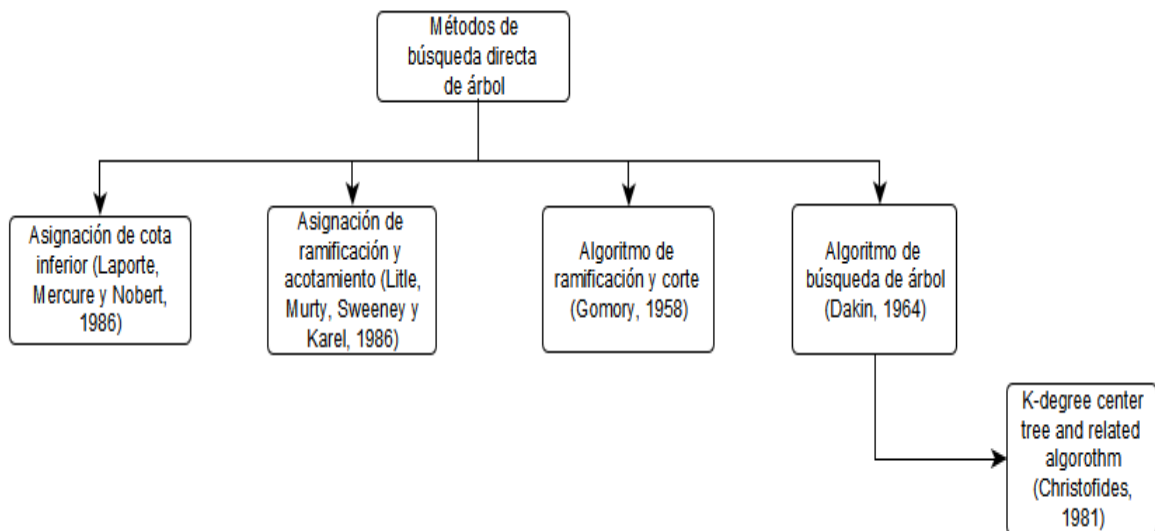


Figura 8. Taxonomía para los métodos de solución mediante búsquedas en árbol, tomada de (Rocha, 2011).

El algoritmo de asignación de cota inferior asigna una cota inferior que permite disminuir el número de vehículos requeridos para visitar todos los vértices. Esto se realiza por medio del m-TSP, como relajación del VRP, proporcionando una cota superior para el número de vehículos y transformándolo en un TSP (Laporte G. , 1991). Por su parte, el algoritmo de ramificación y acotamiento consiste en recorrer cada nodo del árbol desde el nivel superior hacia la base del árbol y los nodos terminales resolviendo en cada nodo un programa lineal y determina que nodos pueden eliminarse. Un nodo se elimina (junto con sus descendientes) si no existe una solución factible; pero si existe solución factible se convierte en una cota inferior. El algoritmo termina cuando todos los nodos han sido revisados y la solución óptima es la de mayor cota inferior (Yepes Piqueras, 2002)]. El árbol del centro de k-gradados (*k-degree center tree algorithm*) trabaja con un número fijo de vehículos, una solución factible en el conjunto de aristas se divide en cuatro subconjuntos que son: las aristas que no pertenecen a la solución, las aristas que forman el árbol, las aristas que inciden en el primer vértice y las aristas que no inciden en el primer vértice. Estos subconjuntos se traducen en restricciones en el modelo y la solución objetivo consiste en sumar el costo de todas las aristas en la solución (Laporte G. , 1991).

PROGRAMACIÓN DINÁMICA: Propuesto por Eilon, Watson-Gandy y Christofides en 1971. En el método se considera un número fijo de m vehículos. Encuentra primero el costo mínimo alcanzable utilizando k vehículos, teniendo en cuenta la función del costo en la longitud de una ruta de vehículos a través de todos los vértices del subconjunto, luego encuentra el costo de todos los subconjuntos de vértices con m vehículos (Laporte G. , 1991).

PROGRAMACIÓN LINEAL Y ENTERA: El método de partición y generación de columnas se considera un conjunto factible de rutas y un coeficiente binario que es igual a uno si, y solo si, determinado depósito pertenece a una ruta. También se tiene en cuenta el costo óptimo de una ruta y una variable binaria que es igual a uno si, y solo si, esa ruta es utilizada en la solución óptima. El valor de este costo se obtiene resolviendo un TSP. Por su parte el método de flujo de vehículos de 2 índices y 3 índices fue desarrollado para CVRPTW. En la formulación de 2 índices X_{ij} representa el camino que une el depósito i con el depósito j . En la formulación de 3 índices la variable X_{ijk} indica el camino que une el depósito i con el depósito j , utilizando el vehículo k . El algoritmo desarrollado está basado en una formulación que garantiza la solución óptima en un número finito de pasos, si se ejecuta hasta finalizarlo. La formulación no exige que los vehículos sean idénticos (Laporte G. , 1991) (Olivera, 2004).

2.3.2. HEURÍSTICAS.

Estas heurísticas son procedimientos simples que realizan una exploración limitada del espacio de búsqueda y dan soluciones de calidad aceptable en tiempos de cálculo generalmente moderados. Las soluciones obtenidas con esta clase de procedimientos pueden, en general, ser mejoradas utilizando métodos de búsqueda más sofisticados, pero incurriendo en elevados tiempos de ejecución (Olivera, 2004).

A continuación se mencionan las heurísticas mas conocidas, clasificación realizada por (Corona, 2005):

1. Algoritmo de Ahorros basado en Matching. (Clarke, 1964)
- 2 Heurísticas de Inserción.
 - 2.1 Inserción Secuencial de (Mole, 1976)
 - 2.2 Inserción en Paralelo de (Christofides, N., Mingozzi, A., y Toth, P. 1979)
- 3 Métodos Asignar Primero - Rutear Después
 - 3.1 Heurística de Barrido o Sweep (Wren, 1972)
 - 3.2 Heurística de Asignación Generalizada de Fisher y Jaikumar
 - 3.3 Heurística de Localización de Bramel y Simchi-Levi
- 4 Método Rutear Primero - Asignar Después (Beasley, 1983)
- 5 Algoritmos de Pétalos
- 6 Procedimientos de Búsqueda Local
 - 6.1 El operador -intercambio
 - 6.2 El algoritmo de Lin-Kernigham
 - 6.3 El operador Or-opt (Or, 1976)
 - 6.4 Operadores de Van Breedam. (Breedam, 1995)
 - 6.5 GENI y GENIUS (Gendreau, 1992)
 - 6.6 Transferencias cíclicas. (Thompson, 1993)

Las heurísticas son procedimientos que proporcionan soluciones de aceptable calidad mediante una exploración limitada del espacio de búsqueda (Olivera, 2004) (Ayala A. & González E, 2001) (Cruz, Restrepo, & Medina, 2007) Clarke y Wright, propusieron el primer algoritmo que resultó efectivo para resolver el VRP en 1964. La mayoría de las heurísticas clásicas para resolver el VRP fueron desarrolladas entre 1960 y 1990. Estos métodos parten de rutas que contienen un único nodo para encontrar el mejor par (nodo, ruta) que representa la mejor intersección. (Toth & Vigo, 2002) (Balinzki & Quandt, 1964) (Garvin, Crandall, & John, 1957), a continuación se representa su taxonomía general en la figura 9, propiedad de (Rocha, 2011)

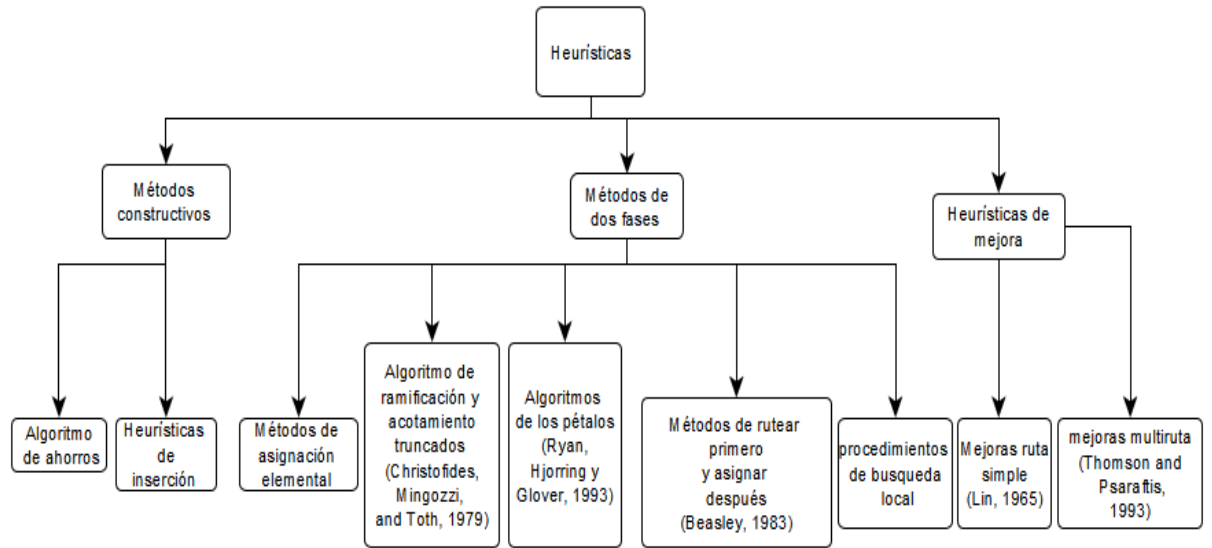


Figura 9. Taxonomía para los métodos de solución heurísticos, tomado de (Rocha, 2011)

2.3.3. METAHEURÍSTICAS.

El énfasis en las técnicas metaheurísticas está en realizar una exploración profunda de las regiones más prometedoras del espacio de solución. La calidad de las soluciones producidas por estos métodos es mucho mejor que la obtenida por las heurísticas clásicas, aunque su tiempo de cómputo es por lo general mucho mayor (Daza, 2009).

Las metaheurísticas más conocidas son:

1. Algoritmo hormiga híbrido para VRP
2. Tabu search
 - 2.1. El algoritmo de Osman. (Osman, 1993).
 - 2.2. El algoritmo de Taillard. (Taillard, 1993).
 - 2.3. El algoritmo flor. (Rego, 1998).
 - 2.4. Granular Tabu Search. (Toth P. y., 2003).
 - 2.5. DETABA. (Barbarosoglu, 1999).
3. Algoritmo genético
 - 3.1 *Genetic Vehicle Representation* (GVR). (Pereira, 2002)
 - 3.2. Algoritmo de Baker y Ayechechew (Baker, 2003)

Las Metaheurísticas fueron desarrolladas hacia finales de la década de los 90 y se caracterizan por que realizan un procedimiento de búsqueda para encontrar soluciones de aceptable calidad, mediante la aplicación de operadores independientes del dominio que modifican soluciones intermedias guiadas por la idoneidad de su función objetivo. Dentro de estas se encuentran el Recocido Simulado, Redes Neuronales, Búsqueda Tabú, Algoritmos Genéticos, Algoritmos de Hormigas y Búsqueda de vecindades (Contardo Vera, 2005). En la Figura 10 se muestra la clasificación establecida a partir de los autores (Toth & Vigo, 2002) (Olivera, 2004) (Díaz D. , 2007)

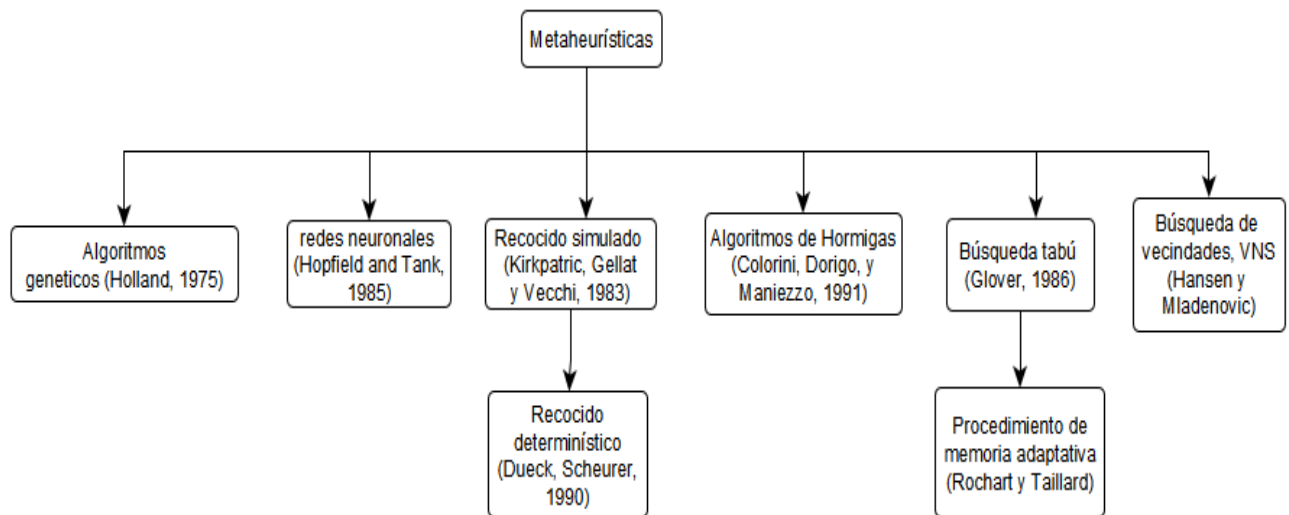


Figura 10. Taxonomía para los métodos de solución metaheurísticos, tomado de (Rocha, 2011)

ALGORITMOS GENÉTICOS (*Genetic Algorithms*). Inspirado en la teoría de la evolución darwiniana, este algoritmo parte de una población inicial de individuos que representan soluciones iniciales factibles pero subóptimas. Seguidamente el algoritmo evoluciona mediante la aplicación de operadores evolutivos que combinan y modifican a los individuos de la población creando una nueva. Para cada individuo se define una función de aptitud f_i que califica su idoneidad. Usualmente, se trabajan tres operadores: selección, cruzamiento y mutación (Toth & Vigo, 2002) (Olivera, 2004) (Mourkousis, Protonotarios, & Varvarigou, 2003) (Petch & Salhi, 2007) (Frederick & Gerald, 2010).

La forma de operar de estos algoritmos para la solución del VRP se resume de la siguiente forma. Se generan soluciones iniciales, las cuales representan cada viaje como una secuencia de ciudades (a diferencia de los algoritmos genéticos tradicionales que utilizan una representación de dígitos binarios). Para cruzar dos soluciones, se toma una subruta que no necesariamente cumpla que inicie y termine en el depósito, y se determina el cliente más cercano que no esté en la subruta. Si la ruta no fuera factible, se particiona. De ésta manera se genera un descendiente, es decir, una copia modificada de una de las soluciones iniciales.

Usualmente para este tipo de problemas, se consideran cuatro operadores de mutación: intercambio de la posición de dos nodos en una ruta; inversión del orden de la ruta; reinserción de un nodo en una ruta diferente a la original y selección de una subruta para insertarla en otro lugar de la solución.

ALGORITMO COLONIA DE HORMIGAS (*Ant Algorithms*). Estos algoritmos están inspirados en la estrategia que usan las colonias de hormigas en la búsqueda de alimentos. Cuando una hormiga encuentra el camino para ir a la fuente de alimento deposita una sustancia (feromona) que depende de la longitud del camino y la calidad del alimento. Las hormigas tienden a seguir los trayectos con mayor cantidad de feromonas puesto que es más probable que conduzcan más rápido hacia la fuente de alimento, lo que a su vez provoca un refuerzo de los mejores trayectos, es decir, los que demoren menos tiempo y por donde transiten la mayor cantidad de hormigas (Toth & Vigo, 2002) (Olivera, 2004) (Doerner, 2001).

En el caso de los VRP, el modo de funcionamiento de estos algoritmos se resume así: Se inicializa el algoritmo colocando una hormiga en cada nodo. Para la construcción de caminos, se utiliza una regla probabilística que asigna una probabilidad igual a cero si el nodo ya fue visitado y diferente a cero para el caso contrario. La hormiga visita el nodo que tenga una probabilidad mayor. En cada arco, se actualiza la “feromona” y finaliza si se obtiene una solución inferior a una cota preestablecida, de lo contrario se recalculan probabilidades y la hormiga sigue construyendo soluciones.

BÚSQUEDA TABÚ (*Tabu Search*). Consiste en realizar una búsqueda local aceptando soluciones que mejoran el comportamiento del costo de tal manera que en cada iteración al algoritmo se mueve de una solución (st) a otra mejor ($st+1$) dentro de un subconjunto de soluciones cercanas. Como $st+1$ no necesariamente es el menor costo, se utiliza una memoria de corto plazo que registre algunos atributos de soluciones ya visitadas. Estas soluciones prohibidas se llaman soluciones tabú y las movidas que llevan a esas soluciones se llaman movidas tabú. En algunos casos es necesario aceptar soluciones tabú porque poseen mejores atributos que las demás y para esto se utiliza un criterio llamado criterio de aspiración; el criterio también se usa para aceptar soluciones que no son tabú. A estas soluciones por las cuales pasa el criterio de aspiración se llaman soluciones admisibles y la búsqueda se realiza sobre las soluciones admisibles de la vecindad (Olivera, 2004) (Gupta, 2002) (Laporte, Hertz, & Mittaz, 2000) (Frederick & Gerald, 2010).

El procedimiento para un problema de ruteo debe responder a los seis criterios siguientes:

- *Algoritmo de búsqueda local*: Se genera una solución inicial de prueba, la cual puede ser cualquier secuencia de nodos, se inician las iteraciones seleccionando el mejor vecino inmediato que no esté descartado de la lista Tabú

- *Estructura de vecindad*: Se generan dos arcos (que unan dos nodos) y se eliminan dos de la solución actual, debe tenerse cuidado de descartar subviajes que solamente inviertan la dirección de la ruta.
- *Forma de los movimientos Tabú*: Enumerar los arcos de tal manera que un subviaje inverso se convierta en tabú si los dos arcos que se eliminan se encuentren en la lista.
- *Adición de un movimiento Tabú*: En cada iteración del algoritmo, después de incluir dos arcos a la solución actual, también se incorporan estos dos arcos a la lista tabú
- *Tamaño máximo de la lista Tabú*: Se debe generar un criterio bajo el cual un par de arcos se inserte a la lista y salgan los que llevan más tiempo en ella.
- *Regla de detención*: Criterio para detener el proceso puede ser después de un número consecutivo de iteraciones, donde no se produzca mejoras en la solución.

Otras metaheurísticas utilizadas en el problema VRP son: VNS (*Variable neighborhood search*) (Toro Ocampo et al., 2016) Memoria Adaptativa (*Adaptive Memory*) (Olivera & Viera, 2007). Redes Neuronales (*Neural Networks*), (Toth & Vigo, 2002), (Golden, Raghavan, & Wasi, 2008), (Arbelaitz & Rodríguez, 2004), (Frederick & Gerald, 2010). Recocido Simulado (*Simulated Annealing*) y Recocido Determinístico (*Deterministic Annealing*) (Toth & Vigo, 2002);

CAPÍTULO 3. TAXONOMÍA DE LOS PROBLEMAS DE RUTEO VEHICULAR (VRP).

3.1 INTRODUCCIÓN A LA TAXONOMÍA DEL VRP.

Tan importante como lo es la publicación de los resultados o conclusiones de una buena investigación es la revisión sistemática y periódica de las publicaciones acerca del tema de interés. Según (Reisman, 1992), hay por lo menos dos maneras eficientes y eficaces de consolidar los conocimientos; una de ellas es crear una taxonomía, otra es crear un marco generalizado que resuma todos los modelos existentes, hechos o teorías del campo específico.

Una taxonomía muestra el objeto de dominio de una disciplina en términos que sean fáciles de entender, comunicar, enseñar, aprender y trabajar, además permite el almacenamiento eficaz y eficiente de la literatura disponible con el fin de identificar vacíos en la misma, pero no se limita solo a eso, sino también, a identificar las direcciones y especificaciones a tener en cuenta para investigaciones futuras. Se presenta una taxonomía del problema de ruteo de vehículos, donde se consideran los tipos de estudios que pueden abordarse para resolver los VRPs; Las características asociadas al escenario, las cuales van desde la naturaleza de los datos asociados a tiempos de

espera, condiciones de entregas y recogidas de mercancías, ventanas de tiempo, hasta la consideración de efectos ambientales asociadas a la operación de la flota de vehículos. Además se consideran características físicas del problema relacionadas con la red de distribución, depósitos, clientes, aspectos de la flota de vehículos, tiempos de viajes y tipos de elementos a transportar. Finalmente se listan las características de la información y características de los datos usados para analizar los problemas de ruteo.

3.2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA SEGÚN LA FORMULACIÓN DE VRP

El primer problema planteado tipo VRP fue el del agente viajero o TSP (*Travelling Salesman Problem*) introducido por Flood en 1956. El problema recibe éste nombre porque puede describirse en términos de un agente vendedor que debe visitar cierta cantidad de ciudades en un solo viaje, de tal manera que inicie y termine su recorrido en la ciudad “origen”; el agente debe determinar cuál ruta debe seguir para visitar cada ciudad una sola vez y regresar de tal manera que la distancia total recorrida sea mínima. En el desarrollo de este trabajo se abordan gran parte de las versiones del VRP, partiendo del problema base sobre el que se desarrolla la temática del ruteo vehicular, el TSP, donde se necesita diseñar una ruta que visite todos los clientes. Luego aparece el M-TSP, el cual considera la visita de todos los clientes de una red con varias rutas, tanto en el TSP como en el M-TSP, el objetivo es visitar todos los clientes minimizando el costo de los arcos activos (Bolanos, 2016). Con base en el M-TSP se define el CVRP que corresponde al VRP más general, donde se considera una flota de vehículos con capacidad limitada despachada desde un depósito para atender la demanda de los clientes. Cuando se consideran múltiples depósitos aparece el MDVRP y si además se debe definir la localización de los depósitos se define el CLRP. De la formulación propuesta por Flood, nacen variaciones como el TSP generalizado en 1959 con Dantzing y Ramser; trabajo en el cual se modela el despacho de combustible a través de una flota de camiones a diferentes estaciones de servicio, desde una terminal. Este trabajo se convierte en la base para un desarrollo posterior de otras formulaciones que van incrementando el número de variables y restricciones (Toth & Vigo, 2002) (Olivera, 2004). (Golden, Raghavan, & Wasil, 2008)

Además, se considera la opción de usar una flota propia de vehículos o la utilización de una flota totalmente subcontratada donde los vehículos usados en la atención de los clientes se contratan a través de una empresa transportadora y por tanto no es necesario que retornen al depósito después de visitar el último cliente, estos problemas se denominan problemas de ruteo abierto: OLRP, MDOVRP y OVRP. También, se incluyen problemas de ruteo donde se considera una flota mixta de vehículos, esta

variante aparece cuando la flota propia es insuficiente para atender la demanda de los clientes o en la gestión logística de desastres.

En 1969, a partir del trabajo de Tillman, se da origen al TSP probabilístico o PTSP. El objetivo de este problema es encontrar el mínimo costo de recorrido esperado a través de un conjunto de nodos con probabilidades asociadas a la presencia o no de consumidores que requieren ser servidos (Golden, Raghavan, & Wasil, 2008). La Figura 11. Se presenta una clasificación de los problemas de ruteo en su versión general.

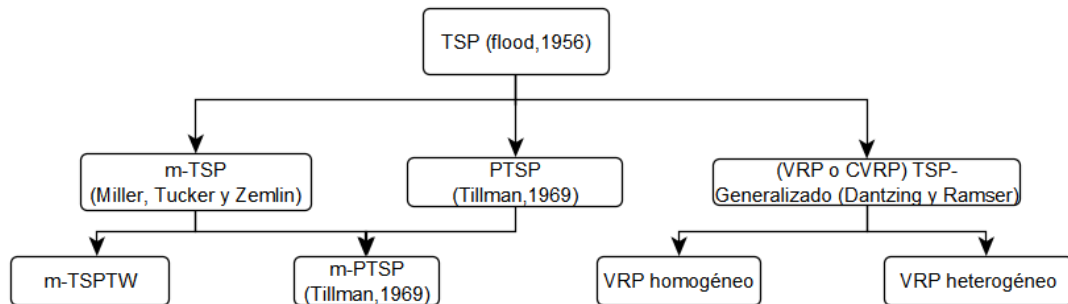


Figura 11. Modelos originarios del problema VRP. Tomado de (Rocha, 2011)

La primera consideración a observar es que el TSP generalizado, es decir el problema de los m agentes viajeros puede ser asumido como un VRP y aún más allá, como un CVRP (*Capacited VRP*), es decir como un problema de ruteo de vehículos donde la capacidad de la flota se convierte en restrictiva para la formulación. La función objetivo del CVRP minimiza el costo total para surtir a todos los consumidores. En este tipo de problema, a los consumidores les corresponde una demanda determinística, todos los vehículos son iguales y salen de un centro de distribución.

El CVRP encuentra una cantidad exacta de rutas con mínimo costo definido como la suma de los costos de los arcos pertenecientes a los recorridos, de tal manera que cada recorrido visita el centro de distribución, cada centro de consumo es visitado por exactamente un vehículo y la suma de las demandas de los centros de consumo visitados no excede la capacidad del vehículo. Cuando el costo de ir de un centro de consumo i a otro centro de consumo j es igual al costo de ir del centro de consumo j al centro de consumo i el problema es llamado CVRP Simétrico (*Symmetric CVRP*, SCVRP) en caso contrario se denomina CVRP Asimétrico (*Asymmetric CVRP*, ACVRP) (Toth & Vigo, 2002) (Bianchi L. et al, 2004) (Díaz D. , 2007)].

A partir del TSP generalizado (es decir el VRP o CVRP) se desprenden dos grandes categorías definidas en este artículo: El VRP homogéneo y el VRP heterogéneo. El VRP homogéneo se refiere a características comunes en las que todos los nodos manejan el mismo recurso como distancia, ventanas de tiempo, retornos

y entregas fraccionadas. Por su parte, el VRP heterogéneo se refiere a componentes desiguales en las que cada nodo maneja recursos distintos bien sea flota de vehículos, depósitos, viajes y componentes estocásticos en algunos casos. A continuación se presenta la taxonomía establecida en la presente revisión bibliográfica de las diferentes variantes surgidas dentro de estas categorías.

3.2.1. VRP HOMOGÉNEO

Los modelos VRP homogéneo, se pueden subdividir en cuatro tipos como se muestra en la figura 12: DVRP (*Distance VRP*), VRPTW, (*VRP with time windows*), VRPB (*VRP with backhauls*, es decir, con retornos) Y SDVRP (*Split delivery VRP*, con entregas divididas). Se considera el DCVRP (*Distance and capacited VRP*) como una sub división del DVRP, los cuales han sido estudiados en (Toth & Vigo, 2002) (Olivera & Viera, 2007). El VRPTW que aparece en 1967, presenta las variaciones tales como el VRPTD (*VRP with time deadlines*, ventanas rígidas de tiempo) en 1986, el VRPMTW (VRP con ventanas de tiempo múltiples) el cual es formulado en 1988; y VRPSTW (*VRP with soft time windows*, ventanas blandas de tiempo) en 1992 (Toth & Vigo, 2002) (Olivera, 2004) (Golden, Raghavan, & Wasil, 2008). El tercer tipo de modelos en el VRP homogéneo, es el VRPB en 1985, que deriva en VRPBTW en 1994, una combinación de VRPB y VRPTW. La última variante en desarrollarse fue el SDVRP (*Split Delivery VRP*, con entregas fraccionadas) en 1989. En 1995 sufre una variación denominada SDVRPTW (entregas fraccionadas y ventanas de tiempo), siendo la unión del SDVRP y VRPTW (Toth & Vigo, 2002) (Olivera & Viera, 2007) (Golden, Raghavan, & Wasil, 2008). Todas estas variantes son representadas en la figura 12.

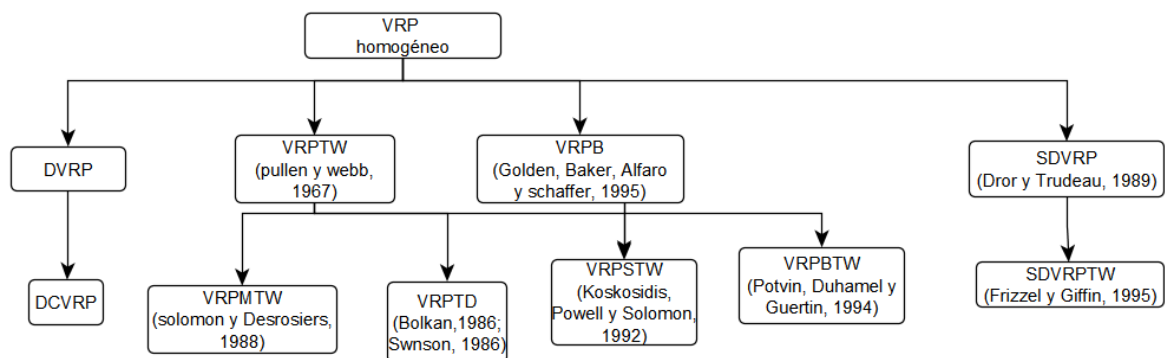


Figura 12. Taxonomía para el VRP Homogéneo, tomado de (Rocha, 2011)

3.2.1.1. PRINCIPALES VARIANTES DE LOS VRP HOMOGÉNEOS.

Problema de ruteo vehicular con capacidad (CVRP) (*Capacitated Vehicle Routing Problem*): este toma en cuenta la capacidad del vehículo. Como se muestra en la figura 59, a los nodos se les asignan demandas específicas. (Baldacci R. a., 2004), (Baldacci R. T., 2010) resuelven el problema con algoritmos exactos. 1273 resultados son mostrados en las estadísticas de los últimos 18 años, las figuras 60 y 61 muestran los documentos por año y por autor para los años mencionados.

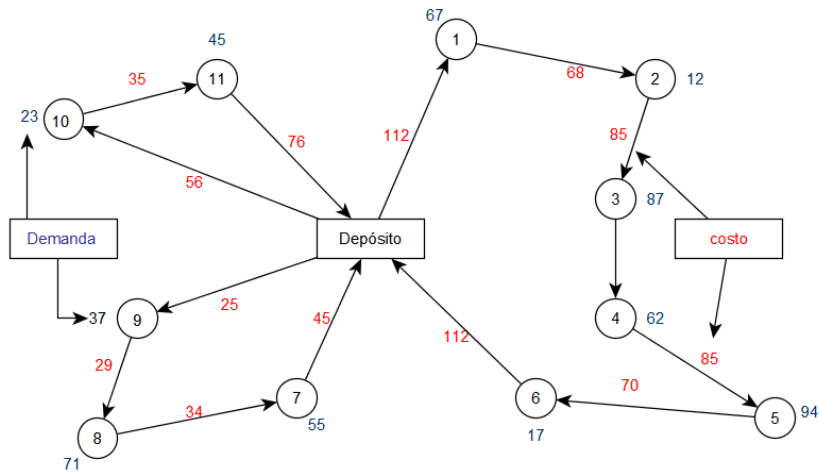


Figura 13. Representación grafica para CVRP, tomado de (Konstantinidis, Savvas, & Char, 2014)

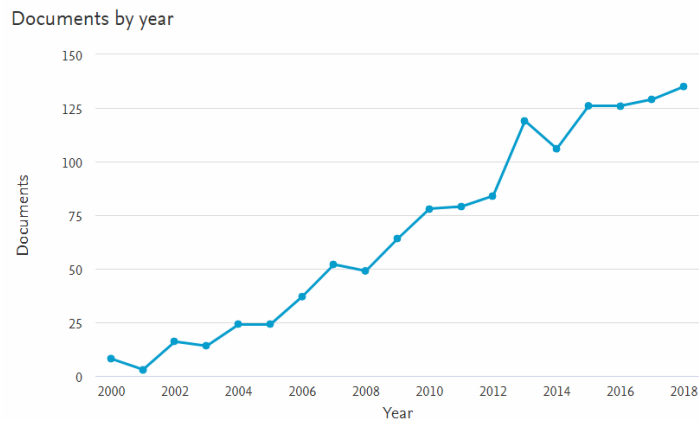


Figura 14. Documentos por año para CVRP, (Scopus., 11/7/2018)

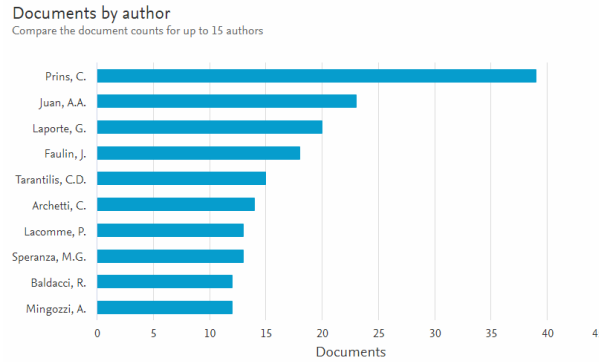


Figura 15. Documentos por autor para CVRP, (Scopus., 11/7/2018)

VRP con ventanas de tiempo (VRPTW) *Vehicle Routing Problem with Time Windows*. Es un problema de VRP con la restricción adicional de una ventana de tiempo asociada a cada consumidor, definiendo un intervalo dentro del cual el consumidor debe ser atendido, el intervalo en el depósito es llamado horizonte de programación. En este tipo cada consumidor está asociado con un intervalo de tiempo llamado *Time Windows* (Ventana de Tiempo). En el instante en el que los vehículos salen del centro de distribución, se da el tiempo de recorrido para cada arco y así mismo un tiempo de servicio adicional para cada consumidor. El servicio de cada consumidor debe empezar dentro de la ventana de tiempo asociada y el vehículo debe parar en el centro de consumo por instantes de tiempo (Toth & Vigo, 2002) (Díaz D. , 2007) (Restrepo & Medina, 2007). En caso que el vehículo llegue antes del tiempo establecido, este debe esperar hasta el instante de tiempo en el que el servicio deba empezar (figura 16). Las ventanas de tiempo están definidas de tal manera que se asume que todos los vehículos salen del centro de distribución en el tiempo cero. En este problema se debe encontrar una cantidad de recorridos simples con el mínimo costo de tal manera que cada ruta o recorrido visita el centro de distribución, cada centro de consumo es visitado solamente por una ruta, la suma de las demandas de los centros de consumo visitados por un recorrido no excede la capacidad del vehículo, para cada centro de consumo el servicio comienza dentro de la ventana de tiempo y el vehículo se detiene por instantes de tiempo, estos tiempos se muestran en los nodos a manera de representación grafica (figura 17). Este tipo de problema tiene extensiones como VRPMTW, VRPTD y VRPSTW (Toth & Vigo, 2002) (Díaz D. , 2007).

El objetivo es servir a todos los clientes en un intervalo definido de tiempo (Solomon, 1987). Presenta soluciones, métodos y aplicaciones. en Solomon (1987) el diseño y análisis de algoritmos para el ruteo de vehículos y problemas de programación fueron considerados con restricciones de ventanas de tiempo, en este trabajo fueron encontrados varias heurísticas bien realizadas en diferentes variantes de VRP. (Bräysy & Gendreau, 2005) Presentaron una complete revisión de metaheurísticas aplicadas a este problema. (Lau,

Sim, & Teo, 2003) Proponen búsqueda tabú para una lista de espera y un mecanismo para forzar un embalaje denso dentro de una ruta.

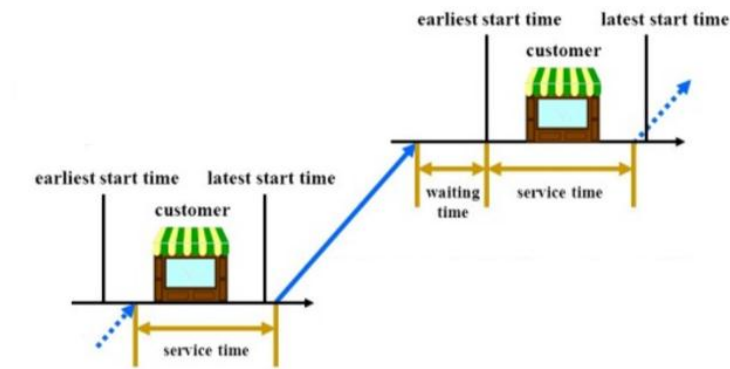


Figura 16. Representación gráfica para VRPTW, (Sripriya , Ramalingam , & Rajes, 2015)

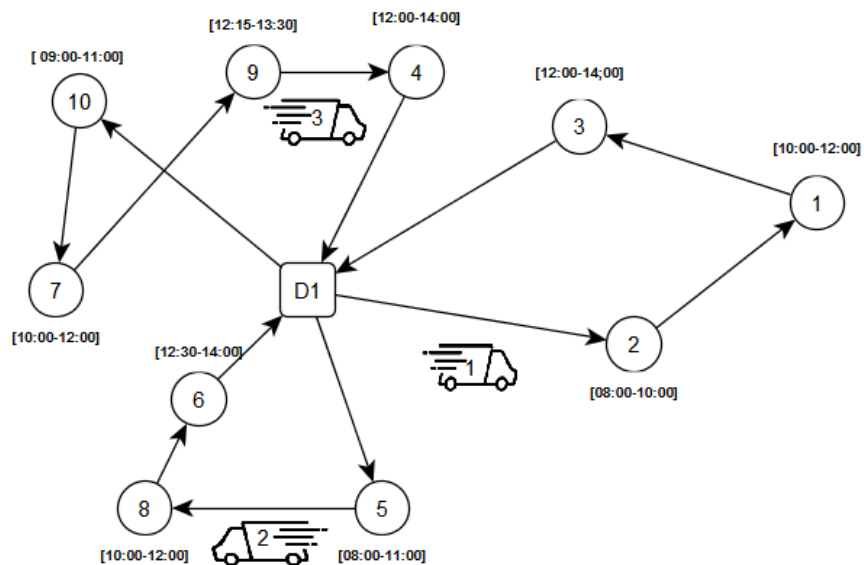


Figura 17. Representación gráfica para VRPTW, (Sripriya , Ramalingam , & Rajes, 2015)

La búsqueda para esta variante (VRPTW) arrojó 2.332 documentos (Scopus., 11/7/2018) que se distribuyen de la siguiente manera entre documentos por año y documentos por autor, figuras 18 y 19.

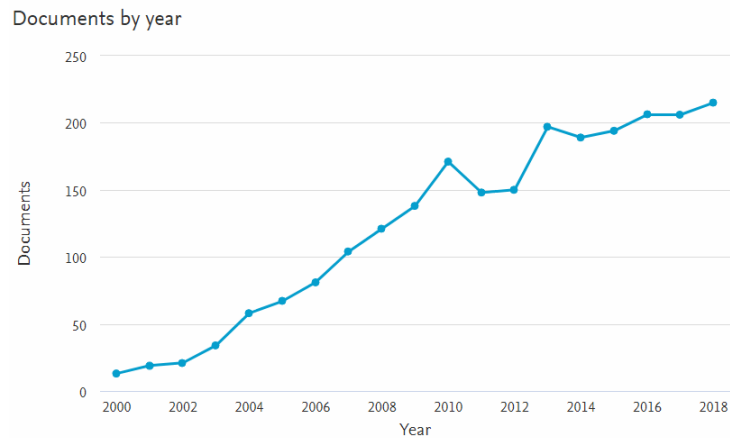


Figura 18. Documentos por año VRPTW (Scopus., 11/7/2018)

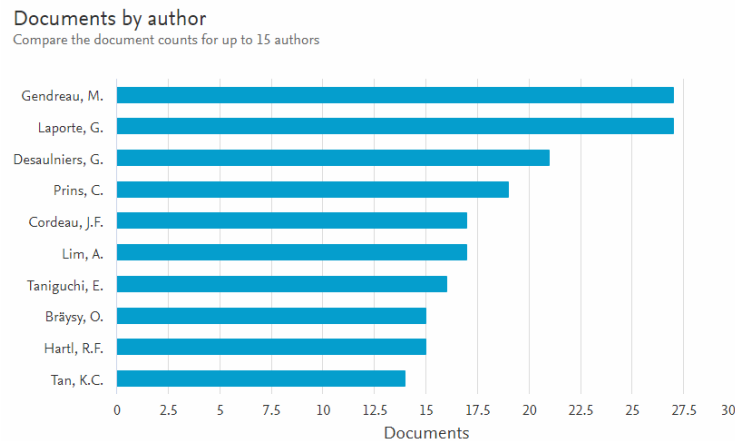


Figura 19. Documentos por autor VRPTW (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular con plazos de tiempo (VRPTD). *VRP with time deadlines* En este problema, los tiempos de recorrido no son fijos pero más bien dependen ambos de la distancia entre los dos vértices y el momento del día (por ejemplo, toma más tiempo llegar desde una locación a otra durante las horas punta o pico). La contribución de esta variante es más cercana a situaciones de modelado en el mundo real. (Thangiah, Vinayagamoorthy, & Gubbi, 1993) Resolvieron el problema con algoritmo genético y local; (Özyurt, Aksen, & Aras, 2006) realizaron un estado del arte del VRPTD.

Para el caso, se han reportado 65 estudios en los últimos 18 años, mostrados en las figuras 20 y 21, estadísticas analizadas para documentos por año y por autor, respectivamente, según la base de datos *Scopus*

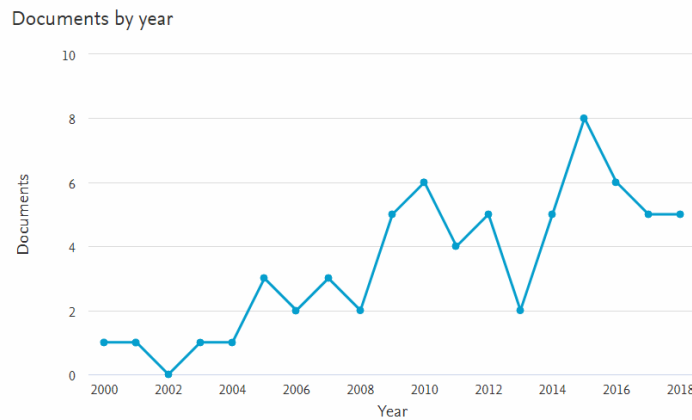


Figura 20. Documentos por año para VRPTD (Scopus., 11/7/2018)

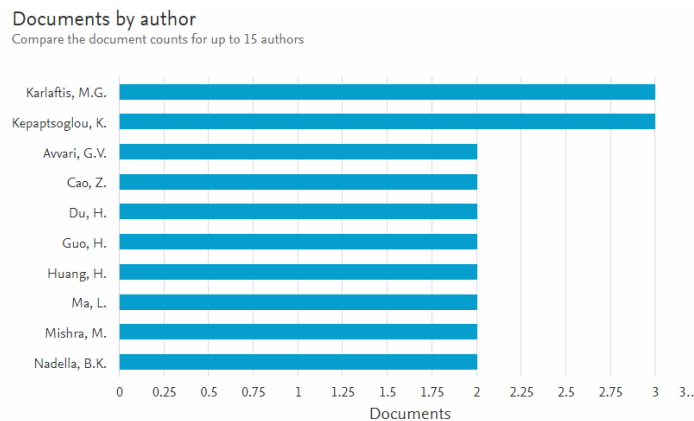


Figura 21. Documentos por autor para VRPTD (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular con multiples ventanas de tiempo (VRPMTW), *VRP with multiple time Windows*. El vehículo puede arribar a la ubicación del cliente antes del límite inferior de la ventana de tiempo, y debe esperar hasta este límite inferior, pero no está permitido arribar después del límite superior de la ventana de tiempo. Estos problemas surgen, por ejemplo, en una tienda de comestibles donde los productos perecederos son entregados a los clientes quienes deben estar en el sitio. Esta aplicación conlleva a varias rutas vehiculares cortas, donde el ultimo cliente de cada ruta debe ser visitado dentro de un tiempo límite desde el comienzo de la ruta (Azi, Gendreau, & Potvin, 2014), Para (Belhaiza, Hansen, & Laporte,

2014) El objetivo del VRPMTW es diseñar un set de m rutas vehiculares de al menos el total del tiempo de recorrido o de al menos la duración de este.

1. Cada cliente es atendido una vez por un vehículo;
2. El servicio de cada cliente comienza dentro de uno de sus ventanas de tiempo; si el vehículo arriba ante del comienzo de la ventana de tiempo, este debe esperar.
3. La demanda total de una ruta no debe exceder la capacidad del vehículo
4. La duración total de una ruta asignada a un vehículo k no puede exceder un límite superior establecido.

Se recuperan 385 documentos en la base de datos *Scopus* mostrando las estadísticas para documentos por año y por autor, figuras 22 y 23.

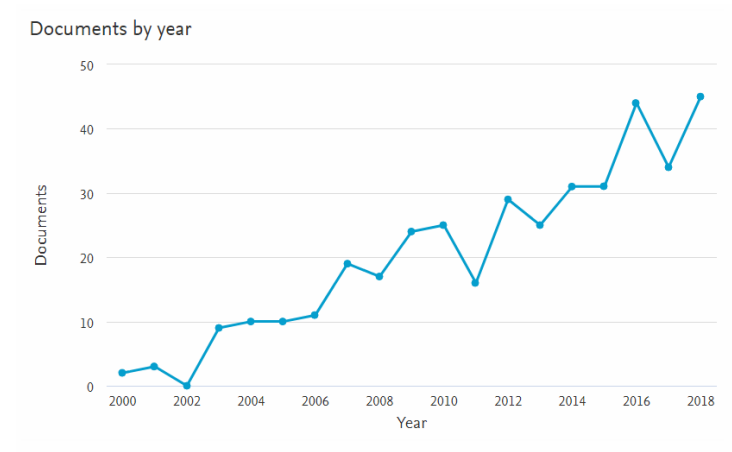


Figura 22. Documentos por año para VRPMTW (Scopus., 11/7/2018)

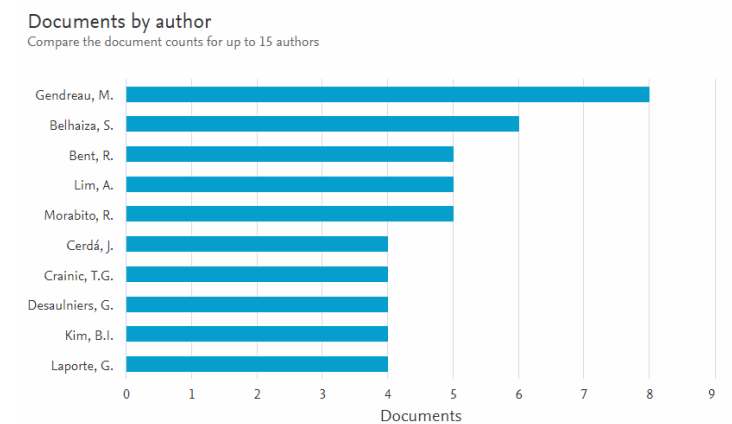


Figura 23. Documentos por autor para VRPMTW (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular con devoluciones, (VRPB) *Vehicle routing problems with backhauls*. En el VRP con retornos (*Backhauls*) los consumidores pueden demandar o retornar algunas mercancías. Es necesario tener en cuenta cuales de los bienes que los consumidores devuelven al vehículo de reparto pueden caber en él. El supuesto más crítico en lo que respecta a todas las entregas, es que éstas deben ser realizadas en cada ruta antes de que alguna recogida pueda ser iniciada. Esto surge del hecho de que los vehículos son cargados en la parte trasera y las cargas reacomodadas en los camiones y que los puntos de entrega son considerados económicamente factibles. Las cantidades a ser distribuidas y recogidas son fijas y conocidas con anticipación (Toth & Vigo, 2002) (Díaz D. , 2007).

En el problema tipo VRPB el conjunto de clientes se divide en dos. El primero contiene n centros de consumo con línea de recorrido (*linehauls*), que requieren que una cantidad dada de productos sea entregada y el segundo contiene m centros de consumo con recorrido de vuelta o retornos (*backhauls*), donde se requiere que una cantidad de productos dada deba ser recogida.

En esta variación de VRP hay una restricción importante entre *linehaul* y *backhaul*, cuando una ruta pueda servir a ambos tipos de consumidores todos los centros de consumo con *linehauls* deben ser atendidos antes que algún centro de consumo con *backhauls*, si los hay (Toth & Vigo, 2002) (Díaz D. , 2007).

Este VRPB consiste en encontrar una cantidad de recorridos simples con mínimo costo de tal manera que cada ruta o recorrido visita el centro de distribución, cada centro de consumo es visitado solamente por una ruta y la suma de las demandas de los centros de consumo con *linehaul* y *backhaul* visitados por un recorrido no excede, individualmente, la capacidad del vehículo (Toth & Vigo, 2002) (Díaz D. , 2007)

Incluye ambos, un grupo de clientes para que aquellos productos sean destinados y un juego de vendedores quienes transportaran el producto en devolución de vuelta al centro de distribución (Wade & Salhi, 2003); como se muestra en la figura 24, se representan la ruta de entrega como nodos circulares, a los que ya estamos acostumbrados, mientras que las rutas de recogida (*backhauls*) se representan con rombos

Para esta variante se han encontrado 145 documentos, en la base de datos *Scopus*, con documentos por año y por autor como se muestra en las figuras 25 y 26.

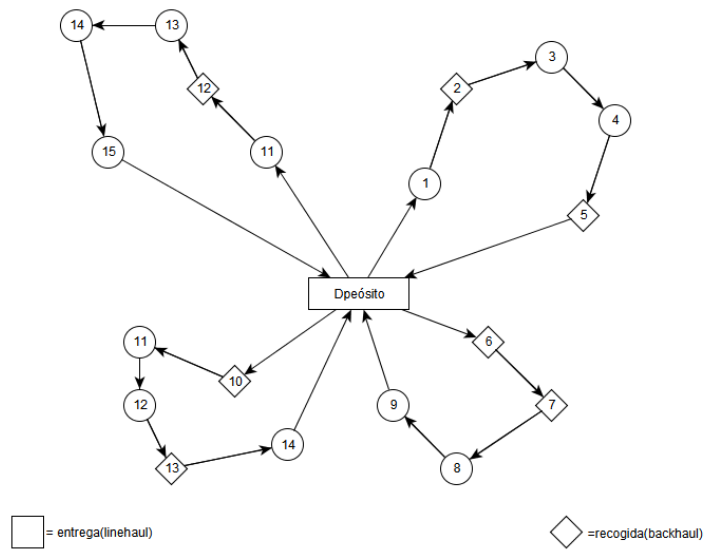


Figura 24. Representación gráfica para VRPB. Tomado de (Toro E. M., 2016)

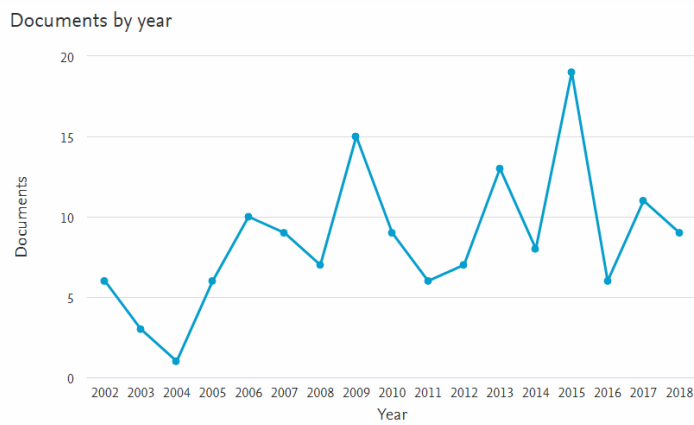


Figura 25. Documentos por año para VRPB (Scopus., 11/7/2018)

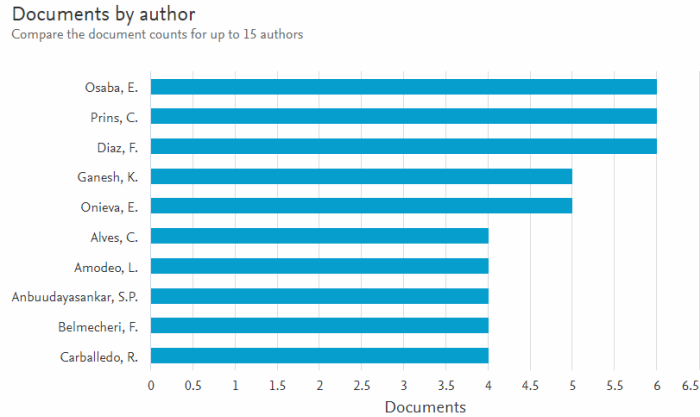


Figura 26. Documentos por autor para VRPB (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular con entrega dividida (SDVRP) *Split Delivery VRP*. Es una relajación del VRP en donde se permite que el mismo cliente pueda ser atendido por diferentes vehículos siempre y cuando se reduzca el costo total. Esta condición es importante si los tamaños de las órdenes de los clientes copan la capacidad de un vehículo (Toth & Vigo, 2002) (Olivera, 2004) (Golden, Raghavan, & Wasil, 2008) (Díaz D. , 2007). Cada cliente debe ser visitado por exactamente un vehículo y el objetivo es minimizar el total de la distancia recorrida. La restricción de que cada uno de los clientes debe ser visitado por exactamente una vez es removida, solo entonces las entregas pueden ser compartidas o divididas entre 2 o más vendedores, esto permite eliminar ciertas rutas y por ende, reducir vehículos de la flota, lo que impacta directamente los costos de operación (figura27), (Archetti, Savelsbergh, & Speranza, 2006) presentaron un estudio del estado del arte. (Wilck IV & Cavalier, 2012) Han planteado una construcción heurística. Se presentan 214 documentos en los ultimos 18 años, distribuidos en las figuras 28 y 29 de la siguiente manera:

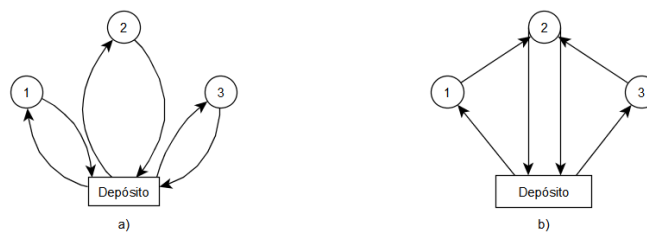


Figura 27. Representacion grafica para SDVRP, a) solucion VRP normal ; b) solucion SDVRP. Tomado de (Dror & Trudeau, 1990)

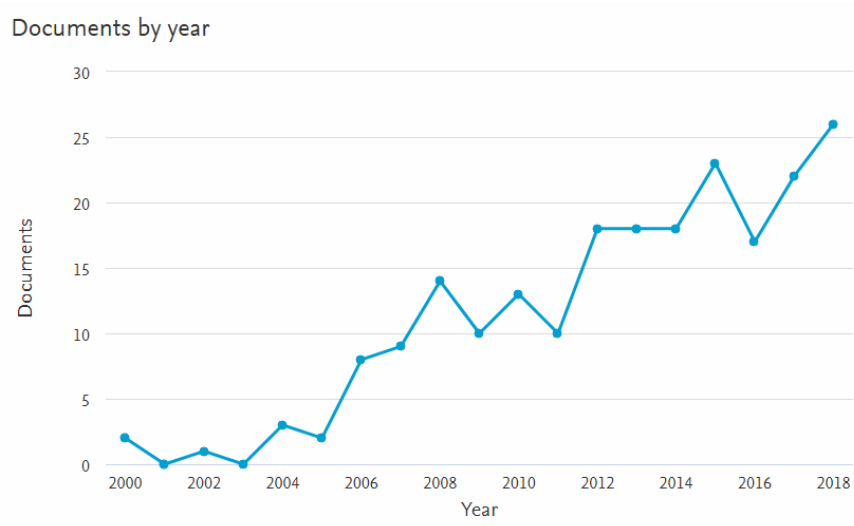


Figura 28. Documentos por año para SDVRP (Scopus., 11/7/2018)

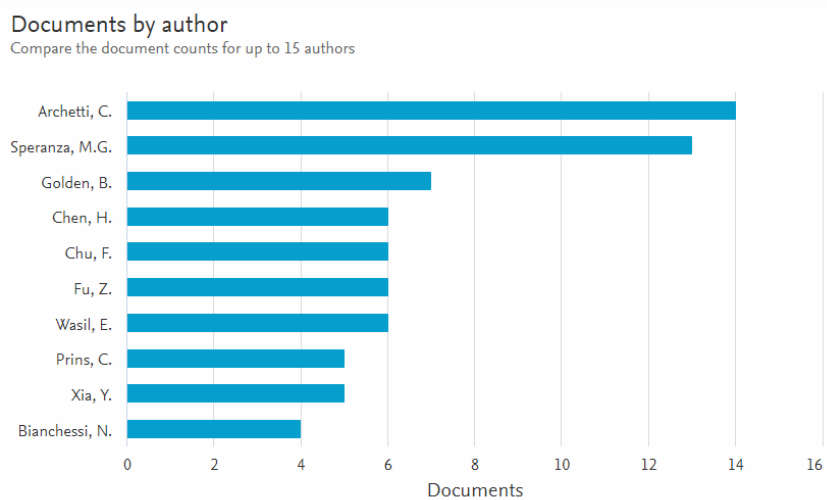


Figura 29. Documentos por autor para SDVRP (Scopus., 11/7/2018)

3.2.2. VRP HETEROGÉNEO

Los modelos VRP heterogéneos referidos a componentes desiguales, se han clasificado de acuerdo al estudio realizado, en los siete tipos mostrados en la Figura 30. Se presenta el nombre del modelo, los autores que los formularon y el año de presentación del trabajo.

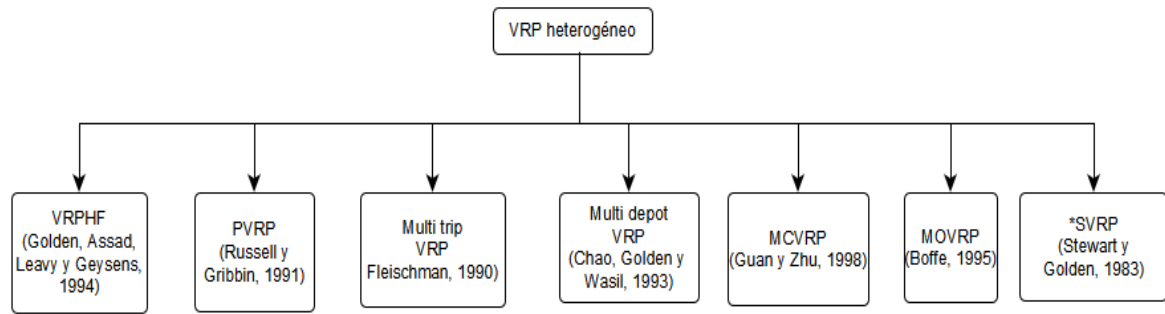


Figura 30. Taxonomía para el VRP Heterogéneo (Rocha, 2011)

3.2.2.1. PRINCIPALES VARIANTES DE LOS VRP HETEROGÉNEOS

Problema de ruteo vehicular con flota heterogénea (VRPHF) *VRP with Heterogeneous Fleet*: En él los costos y capacidades de los vehículos varían; en esta formulación se asume que la cantidad de vehículos de cada tipo es ilimitada, se decide sobre las rutas y la composición de la flota de vehículos a utilizar.

En esta, la flota de vehículos tiene camiones de distintas capacidades. El objetivo de estos problemas es determinar cuáles vehículos utilizar para minimizar la suma de los costos fijos y los costos por recorrido.

La formulación de los problemas VRPHE's cambia con respecto a la formulación general principalmente en la manera en que pueden definirse los diferentes tipos de camiones. Sea un conjunto $T = \{1, \dots, l\}$ indicando los diferentes tipos de vehículos de la flota de entrega, se tiene que un vehículo tipo k que pertenece a T tiene una capacidad de carga Q_k y su número de vehículos disponibles es de m_k . Además, el uso de un vehículo tipo k implica un costo fijo f_k y un costo de recorrido c_{ijk} para viajar desde la ubicación del cliente v_i a la del cliente v_j . (Corona, 2005).

Flota de vehículos de diferentes capacidades, a veces considerando o no, los costos fijos y/o variables en la flota. (Lima, Goldbarg, & Goldbarg, 2004) Presentaron un algoritmo mimético para resolver el problema. El problema considerando ventanas de tiempo fue resuelto por (Paraskevopoulos et al. 2008). (Kwon, Choi, & Lee, 2013) Resolvieron el problema considerando emisiones de carbón. En este caso se encontraron 361 resultados en la literatura, mostrados como documentos por año y por autor (figura 31 y 32), así:

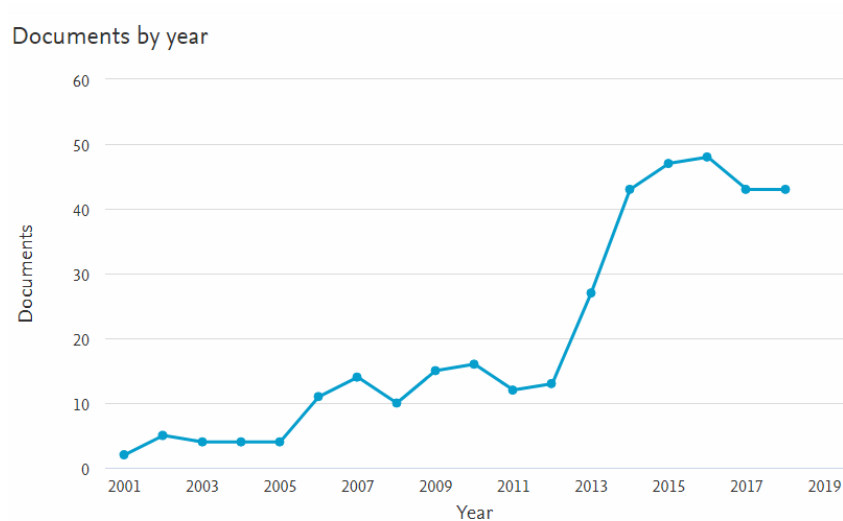


Figura 31. Documentos por año para VRPHF (Scopus., 11/7/2018)

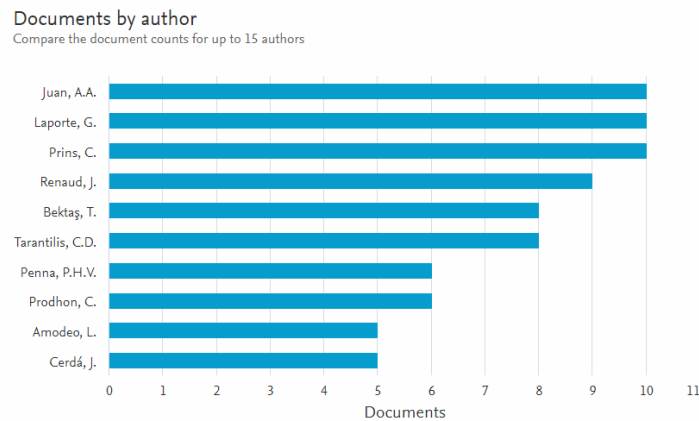


Figura 32. Documentos por autor para VRP, (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular periódico (PVRP) *Periodic VRP*: En los VRP clásicos, típicamente el periodo de planeación es de un solo día, en el caso del VRP periódico (PVRP) el modelo se extiende a un período de planeación de M días. Es un problema VRP donde las entregas pueden ser hechas cada ciertos días. (Corona, 2005) 182 documentos recuperados en la base de datos *Scopus*, para documentos por año figura 33) y para documentos por autor (figura 34).

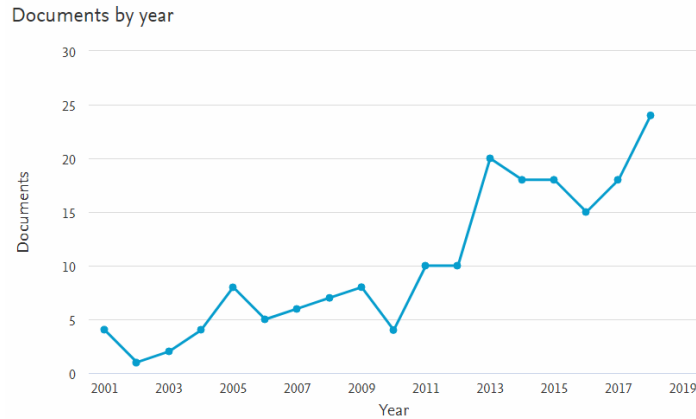


Figura 33. Documentos por año para PVRP (Scopus., 11/7/2018)

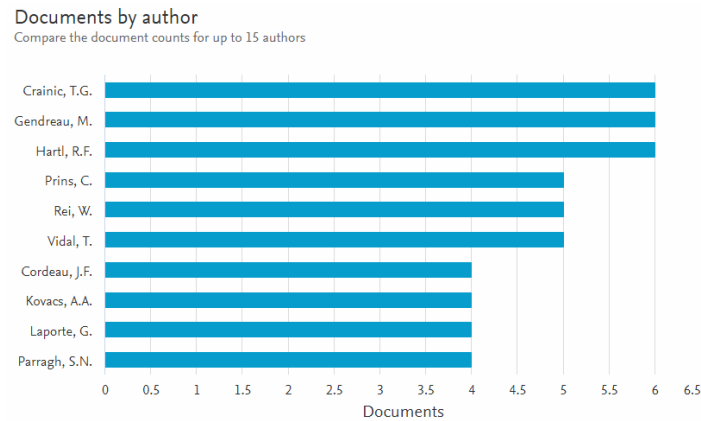


Figura 34. Documentos por autor para PVRP (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular con tiempo dinamico real (RTDVRP). *Real Time Dynamic VRP*, Es una extensión de VRPTW con las dos siguientes diferencias (1) En RTDVRP, el tiempo de recorrido entre nodos cambia dinámicamente debido al cambio de las condiciones del tráfico (figura35); (2) en VRPTW, todos los vehículos parten del almacén en un tiempo cero, mientras que en RTDVRP, algunos de los vehículos son asignados dinámicamente con un tiempo de partida distinto a cero (Corona, 2005): las figuras 36 y 37 muestran los documentos por año y por autor, para un total de 400 resultados en la base de datos científica *Scopus*.

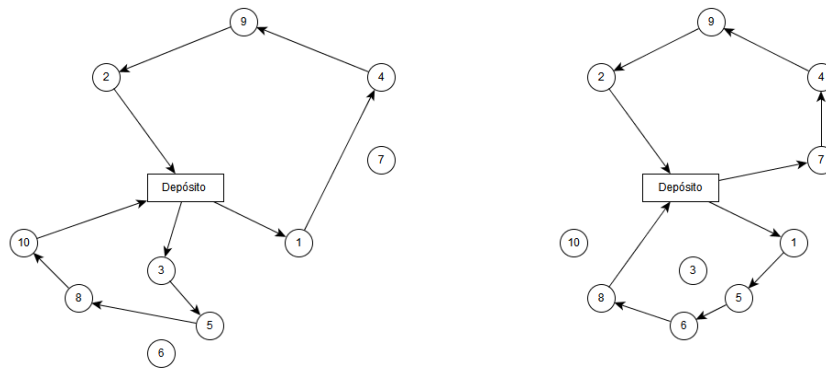


Figura 35. Representación grafica para RTDVRP tomado de (Qili Zhu & Ong, 2000)

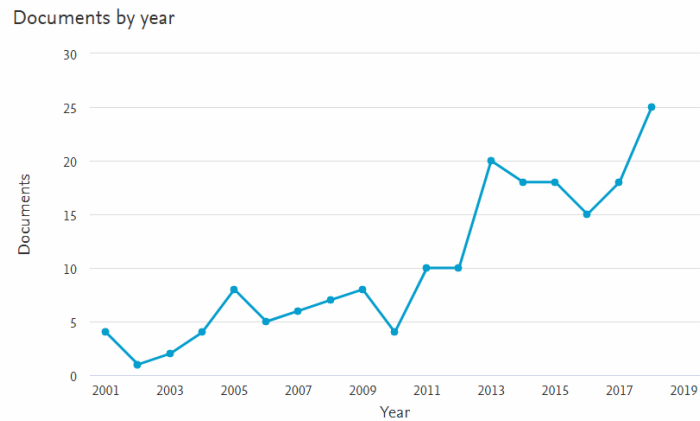


Figura 36. Documentos por año para RTDVRP (Scopus., 11/7/2018)

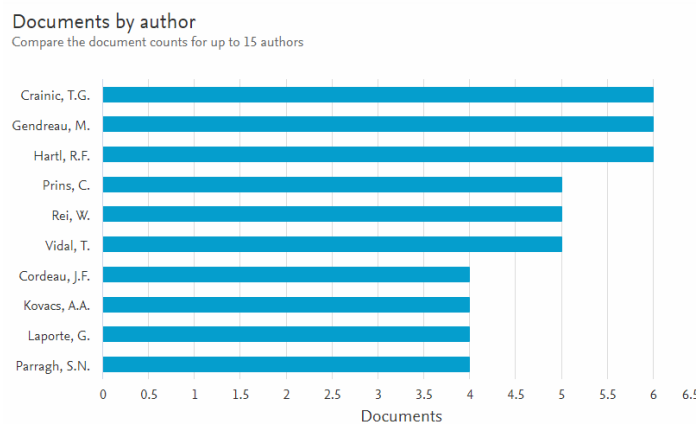


Figura 37. Documentos por autor para RTDVRP (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular con múltiples rutas (M-TVRP), *Multi-Trip VRP*. Consiste en que cada vehículo puede llevar a cabo varias rutas en el mismo periodo de planeación. Resolver este tipo de problema no sólo implica el diseño de un conjunto de rutas, sino también la asignación de esas rutas de los vehículos disponibles. Esto hace que este tipo de problema sea muy práctico a nivel operativo, en el cual los horarios diarios de los conductores deban estar diseñados para una flota de vehículos fija. Consiste, entonces, en determinar la ruta de una flota de vehículos donde cada vehículo puede realizar múltiples rutas en un horizonte de tiempo específico. Esto es relevante en aplicaciones donde la duración de cada ruta es limitada; esta puede ser encontrada cuando productos perecederos son transportados. (Olivera & Viera, 2007) Han resuelto el problema usando programación de memoria adaptativa. (Azi, Gendreau, & Potvin, 2010) Proponen una gran búsqueda de vecindario adaptativa para resolver el M-TVRP; la figura 38 muestra un modelo de múltiples rutas, relacionando clientes de una ruta a otra según las necesidades de entrega. Los documentos encontrados en la base de datos *Scopus* arrojan 528 resultados para el (M-TVRP), seleccionando documentos por año y por autor, como muestran las figuras 39 y 40, respectivamente.

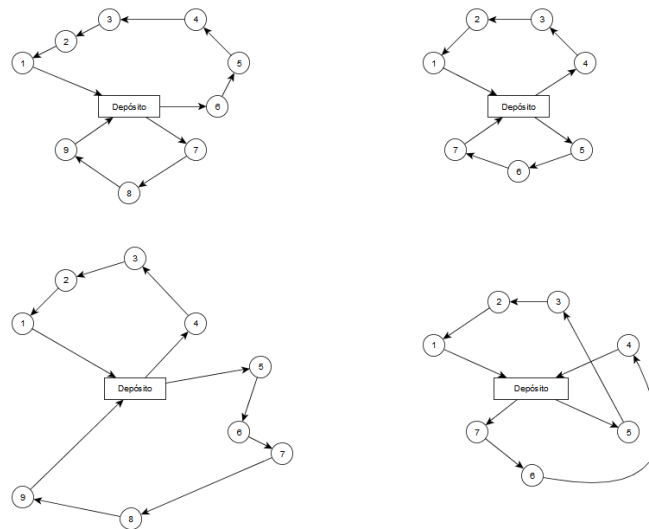


Figura 38. Representación grafica para M-TVRP. (Despau, 2016) a) Se insertan los clientes 6 y 7 en la ruta 2 en el mismo orden; b) el cliente 4 de la ruta 1 se intercambia con el cliente 5 de la ruta 2

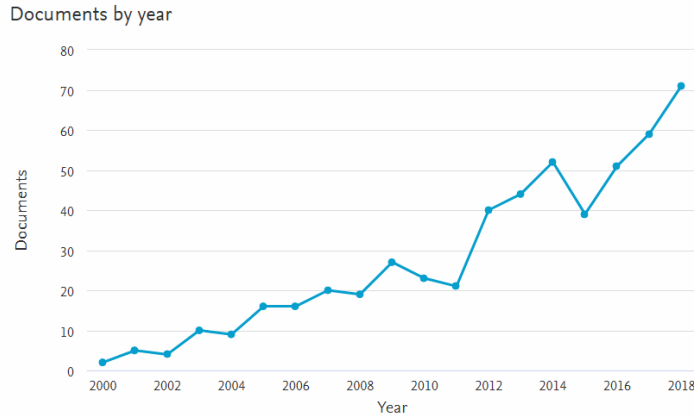


Figura 39. Documentos por año para M-VRP (Scopus., 11/7/2018)

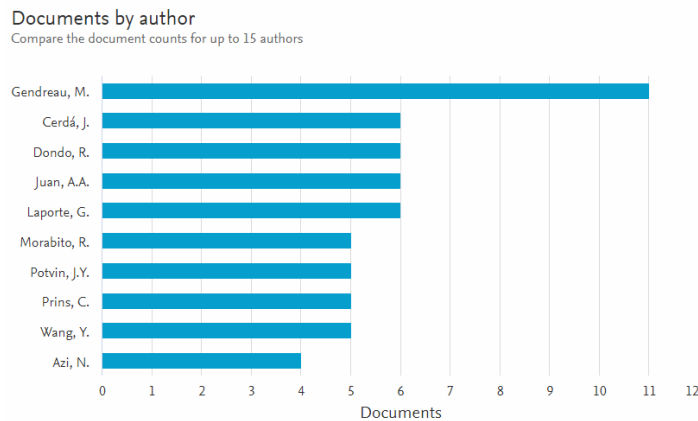


Figura 40. Documentos por autor para M-VRP (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular con múltiples depósitos (MDVRP): *Multi-Depot Vehicle Routing Problem.*

Una compañía puede tener muchos depósitos para atender a sus clientes. Si los clientes son agrupados alrededor de los depósitos, entonces el problema de distribución debe ser modelado con un conjunto de VRP independientes. Sin embargo, si los clientes y los depósitos están entremezclados entonces se debe plantear como un problema VRP multidepósito (MDVRP) (Montoya Torres, 2015). Un MDVRP requiere de la asignación de clientes a depósitos, de la asignación de una flota de vehículos a cada depósito, cada vehículo origina desde un depósito, un servicio al cliente asignado a ese depósito, y el retorno al mismo depósito (Toth & Vigo, 2002), esta distribución multi-depósito se hace evidente en la figura 41.

En esta variante, varios depósitos son considerados para servir a los clientes. Los clientes son usualmente asignados a los depósitos usando estrategias de agrupamiento o clustering. Algunas técnicas de solución han sido usadas en este problema, por ejemplo, (Renaud, Laporte, & Boctor, 1996), (Salhi & Sari, 1997) resolvieron el problema por heurísticas; (Ombuki-Berman & Hanshar, 2009) lo hicieron con algoritmo

genético; (Vidal, 2014) presentó un nuevo estado del arte con resultados para el MDVRP y para MDVFMP problemas mixtos para flotas de vehículos multidepósito con tamaño de flota ilimitada. (Toro Ocampo, 2016), (Ospina Toro, 2018).

Los estudios realizados en esta variante (MDVRP), arrojan 382 resultados (Scopus), para el caso, se muestran los documentos por año (figura 42) y los documentos por autor (figura 43).

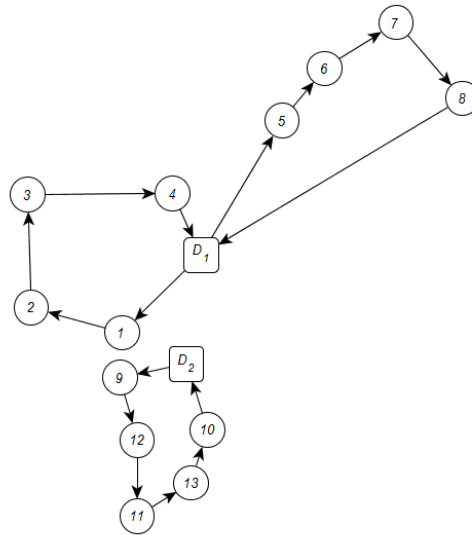


Figura 41. Representación grafica para MDVRP, tomado de (Toro E. M., 2016)

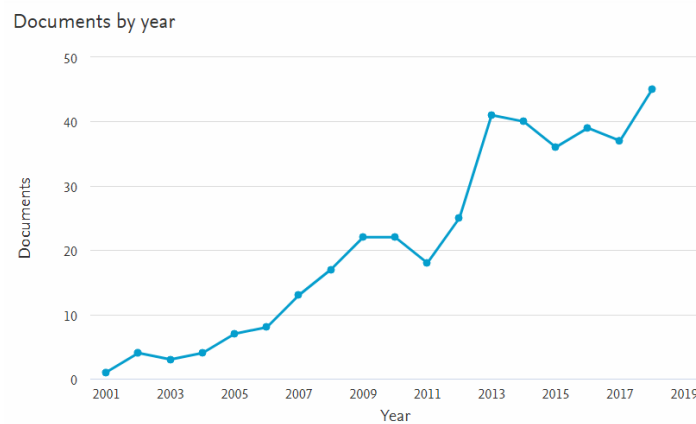


Figura 42. Documentos por año para MDVRP (Scopus., 11/7/2018)

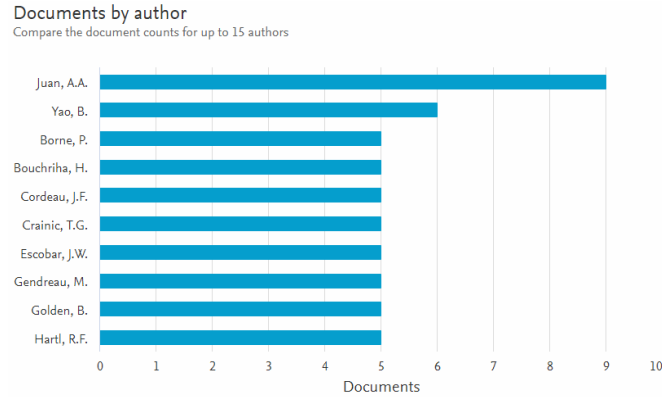


Figura 43. Documentos por autor para MDVRP (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular con multiple capacidad (MCVRP) *multiple capacity VRP*. Consiste en transportar más de una cantidad de objetos a la vez, es decir, si el CVRP se puede considerar como VRP con capacidad 1 y el MCVRP se considera como capacidad mayor a 1. la literatura nos arroja 225 resultados en los últimos 18 años, figuras 44 y 45.

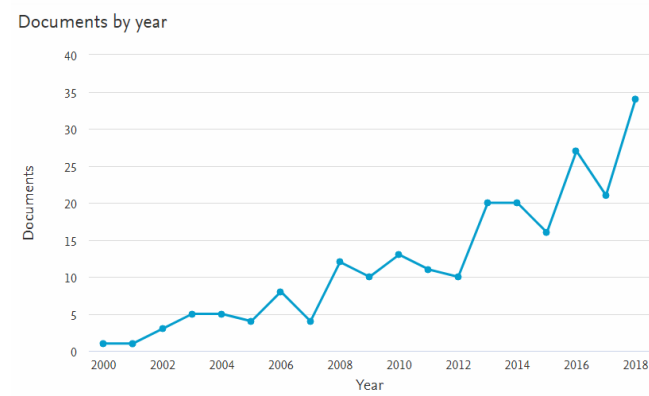


Figura 44. Documentos por año para MCVRP (Scopus., 11/7/2018)

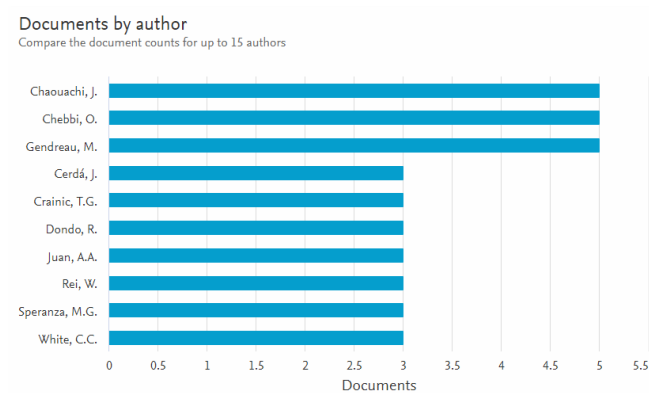


Figura 45. Documentos por autor para MCVRP (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular multi objetivo (MOVRP) *multi-objective VRP*. Consiste en utilizar varios objetivos que pueden relatar diferentes aspectos del VRP como ruta (costo, beneficio, etc.), nodos y arcos (ventanas de tiempo, satisfacción del cliente, etc.) y recursos (mantenimiento de flota de vehículos, especificaciones de producto, etc.). Nuestra búsqueda arrojó 913 documentos, figura 46 (documentos por año) y figura 47 (documentos por autor).

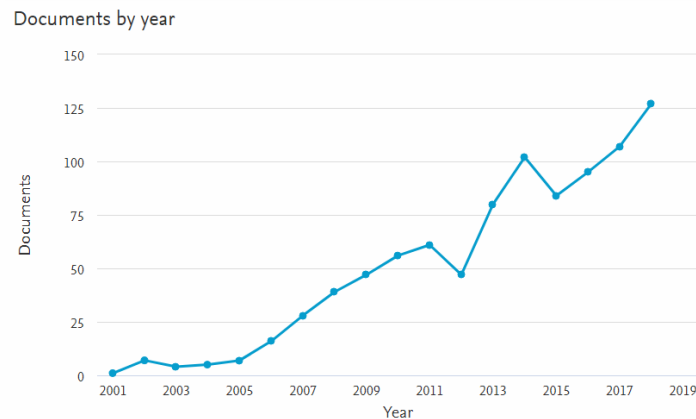


Figura 46. Documentos por año para MOVRP (Scopus., 11/7/2018)

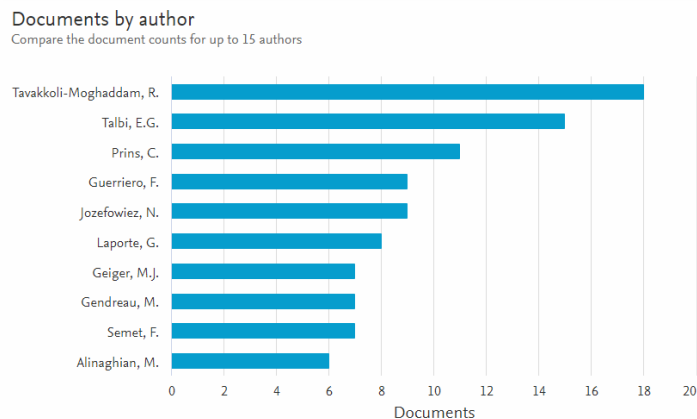


Figura 47. Documentos por autor para MOVRP (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular estocástico (SVRP). *Stochastic VRP*: Se trata del Problema de Ruteo de Vehículos Estocástico donde uno o varios componentes de la formulación son aleatorios. Fue planteado inicialmente en 1983, incluye tres variaciones: VRPUD, cuando la demanda de cada consumidor es una variable aleatoria; VRPSTT cuando los tiempos de servicio y tiempos de viaje son variables aleatorias; y el SVRP-SN, en el cual cada consumidor tiene una probabilidad p de presentarse y $(1-p)$ de estar ausente. Es

un problema VRP con variaciones estocásticas donde por lo menos una de sus variables es modelada a través de una distribución de probabilidad (por ejemplo las demandas de los clientes, el número de clientes, el tiempo de servicio o el tiempo de recorrido) (Restrepo, Medina, & Cruz, 2008). El modelado estocástico de al menos una de sus variables: sobre un grupo y/o la demanda del cliente. (Bertsimas, 1992) Analizó el problema usando una variedad de aproximaciones teóricas y propuso heurísticas como una estrategia de reoptimización. Una heurística de buqueda tabú es propuesta por (Shen, Ordóñez , & Dessouky, 2009). Una importante aplicación es la distribución de suministros médicos para responder a emergencias de gran escala como desastres naturales o ataques terroristas. Las figuras 49 y 50, muestran los 754 artículos sobre el VRP estocástico divididos en documentos por año y por autor en los últimos 18 años. La figura 48, muestra que un nodo puede tener una distribución estocástica, lo mismo que su costo o distancia entre determinados nodos, para el caso, puede haber una demanda de 1 o 7 en el nodo 3, lo mismo que pueden generarse unos costos diferentes entre los nodos 3 y 4.

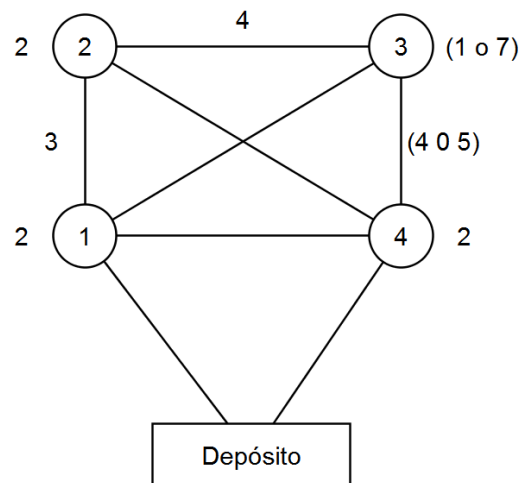


Figura 48. Cuadro sinóptico para SVRP Imagen tomada de (Toro E. M., 2016)

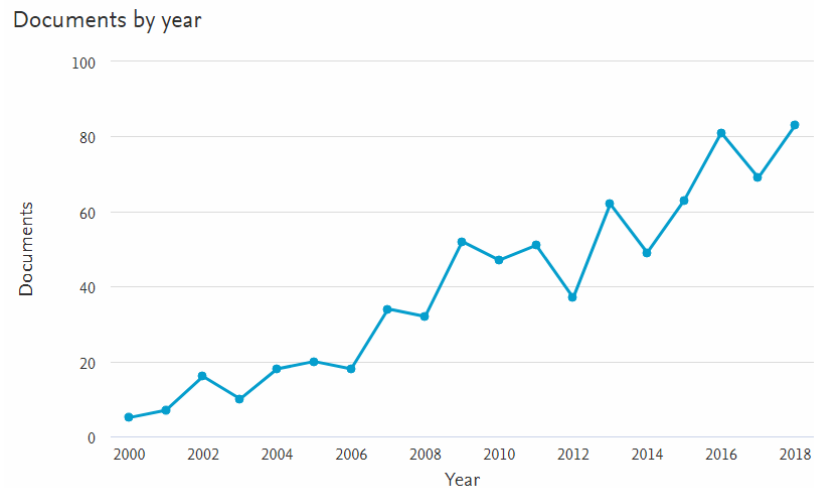


Figura 49. Documentos por año para SVRP (Scopus., 11/7/2018)

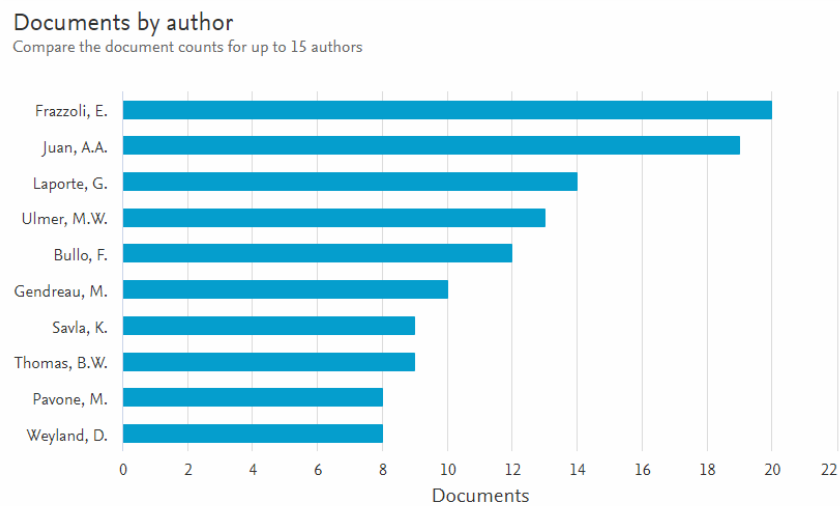


Figura 50. Documentos por autor para SVRP (Scopus., 11/7/2018)

TABLA 1. TAXONOMÍA SEGÚN CARACTERÍSTICAS DEL VRP.

| | | |
|--|--|--|
| 1. Tipo de estudio. | 2.8.2 Nodos separados entrega y recogida. | 3.10 Tiempo de viaje |
| 1.1 Teoría | 2.9 Condición de cubrimiento Nodos/Arcos | 3.10.1 Determinístico. |
| 1.2 Métodos aplicados | 2.9.1 Precedencia y restricciones acopladas. | 3.10.2 Función dependiente del tiempo |
| 1.2.1. Métodos Exactos | 2.9.2 Cubrimiento de subconjuntos | 3.10.3 Estocástico |
| 1.2.2 Heurísticas y Metaheurísticas | 2.9.3 Redireccionamiento permitido | 3.10.4 Desconocido |
| 1.2.3 Matheurísticas | 2.10 Efectos ambientales | 3.11 Costos de transporte |
| 1.2.4 Simulación | 2.10.1 Función Mono-objetivo penalizada | 3.11.1 Con base al tiempo de viaje |
| 1.2.4 Métodos de solución en Tiempo real | 2.10.2 Frentes multi-objetivo eco-eficientes | 3.11.2 Basado en la distancia |
| 1.3 Resumen o meta-búsqueda | 3. Características físicas del problema | 3.11.3 Dependiendo del vehículo ⁴ |
| 2. Características del Escenario | 3.1 Diseño de la red de transporte | 3.11.4 Basado en la operación |
| 2.1 número de paradas en la ruta | 3.1.1 Red dirigida | 3.11.5 Función de tardanza |
| 2.1.1 Determinístico | 3.1.2 Red bidireccional | 3.11.6 Implica riesgos |
| 2.1.2 Parcialmente conocida-probabilística | 3.2 Localización de los clientes | 3.11.7 Emisiones ambientales |
| 2.2 Restricción de partición de la carga | 3.2.1 Clientes sobre los nodos | 3.11.8 Costos de mantenimiento |
| 2.2.1 Partición permitida | 3.2.2 Ruteo de arcos | 3.12 Elementos a transportar |
| 2.2.2 Partición no permitida | 3.3 Localización geográfica-Clientes | 3.12.1 Personas |
| 2.3 Cantidad demandada por el cliente | 3.3.1 Urbana dispersa mediante un patrón | 3.12.2 mercancías |
| 2.3.1 Determinístico | 3.3.2 Rural (aleatoriamente dispersa) | 3.12.3 Personal para prestar servicios |
| 2.3.2 Estocástico | 3.3.3 Mixto | 4. Características de la información |
| 2.3.3 Desconocido ¹ | 3.4 número de puntos Carga/Descarga | 4.1 Evolución de la información |
| 2.4 Tiempos de los nuevos clientes | 3.4.1 Único depósito | 4.1.1 estático |
| 2.4.1 Determinísticos | 3.4.2 múltiples depósitos | 4.1.2 Parcialmente dinámico |
| 2.4.2 Estocásticos | 3.6 Tipo de ventanas de tiempo | 4.2 Calidad de la información |
| 2.4.3 Desconocido | 3.6.1 Sobre los clientes | 4.2.1 Conocida (Determinística) |
| 2.5 Sitio del servicio/ tiempo de espera | 3.6.2 Sobre las vías | 4.2.2 Estocástica |
| 2.5.1 Determinístico | 3.6.3 Sobre los depósitos | 4.2.3 Pronosticada |
| 2.5.2 Dependiente del tiempo | 3.6.4 Sobre los conductores | 4.2.4 Desconocida (Tiempo-real) |
| 2.5.3 Congestión vehicular | 3.7 número de vehículos | 4.3 Disponibilidad de la información |
| 2.5.4 Estocástico | 3.7.1 único | 4. 3.1 Local |
| 2.5.5 Desconocido | 3.7.2 Exactamente (<i>n</i>) vehículos | 4.3.2 Global |
| 2.6 Estructura de la ventana de tiempo | 3.7.3 Flota llimitada | 4.4 Procesamiento de la información |
| 2.6.1 Ventana de tiempo suave | 3.8 Restricciones de capacidad | 4.4.1 Centralizada |
| 2.6.2 Ventana de tiempo estricta | 3.8.1 vehículos capacitados | 4.4.2 Descentralizada |
| 2.6.3 Mixta o ambas | 3.8.2 vehículos de capacidad llimitada | 5. Características de los datos |
| 2.7 Horizonte de tiempo | 3.9 Homogeneidad de los vehículos | 5.1 Datos usados |
| 2.7.1 único periodo | 3.9.1 vehículos similares | 5.1.1 Datos reales |
| 2.7.2 Periodo múltiple | 3.9.2 vehículos de carga específica ² | 5.1.2 Datos artificiales |
| 2.8 Backhauls | 3.9.3 vehículos heterogéneos. | 5.1.3 Ambos reales y artificiales |
| 2.8.1 Entrega y recogida simultánea. | 3.9.4 Adaptación al cliente ³ | 5.2 No se usan datos |

Donde los superíndices corresponden a:

1: Desconocido, se refiere al caso en el cual la información es revelada en tiempo real (por ejemplo estudios dinámicos o fuzzy).

2. Cada vehículo debe ser usado para tipos específicos de carga.

3. Un cliente debe ser visitado por un tipo específico de vehículo. El costo de operación de un vehículo es variable.

CAPÍTULO 4. OTRAS VARIANTES DEL VRP.

Problema de ruteo vehicular en dos niveles (2E-VRP): *Two-Echelon Vehicle Routing Problem*. La figura 51 ilustra esta variante, los bienes son entregados desde los depósitos hasta satélites intermedios, también conocidos como depósitos intermedios, y después a los clientes. (Crainic, 2010) Presentó el análisis sobre el problema; (Perboli, 2010) mostraron modelos matemáticos que representan el problema. Para esta variante de VRP, se obtuvieron 115 resultados en la base de datos de *Scopus*, mostrando los documentos por año y por autor, figuras 52 y 53, respectivamente.

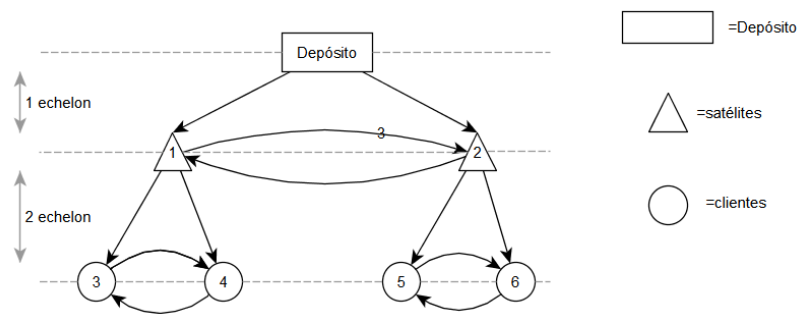


Figura 51. Representación grafica para el 2E-VRP, tomado de (Belgina, Karaoglanb, & Altiparmakc, 2016)

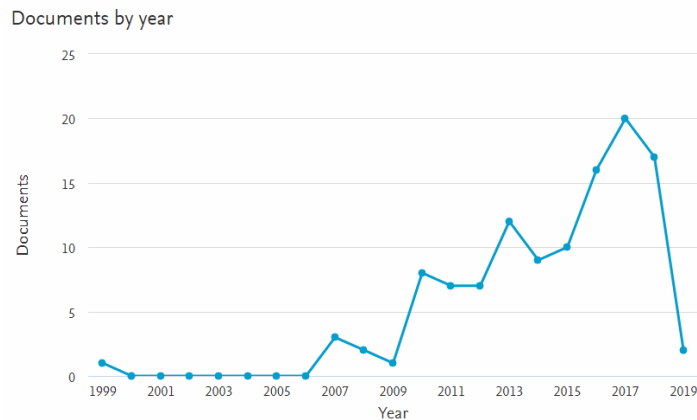


Figura 52. Documentos por año para 2E-VRP, (Scopus., 11/7/2018)

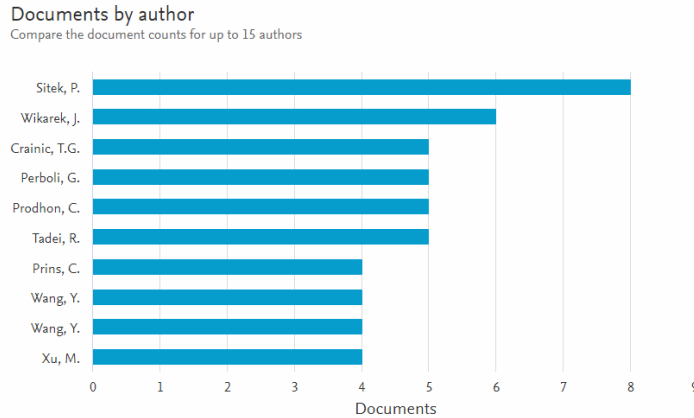


Figura 53. Documentos por autor para 2E-VRP (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular con capacidad asimétrica (ACVRP): *Asymmetric capacitated VRP* los costos de los arcos son asimétricos. Indican que el costo de llegar desde el consumidor i hasta el consumidor j es diferente al costo desde j hasta i . el problema ha sido resuelto en varios en diferentes formas, por ejemplo, (Laporte & Nobert, 1987) proponen un algoritmo exacto, (Vigo, 1996) presenta un algoritmo heurístico; (Pessoa, 2008) proponen un robusto algoritmo de ramas y acotamiento o branch and bound

Para esta variante, se encuentran pocos documentos en los últimos años, 32 documentos, figuras 54 y 55, para la base de datos se Scopus, lo que nos abre un campo poco estudiado y una oportunidad de hacer nuevas investigaciones en este ámbito. La figura 54, muestra que en el VRP asimétrico los costos o la distancia entre ciertos nodos varía según el sentido de esta, es decir, los costos entre el nodo i y el nodo j son diferentes a los costos entre el nodo j y el nodo i .

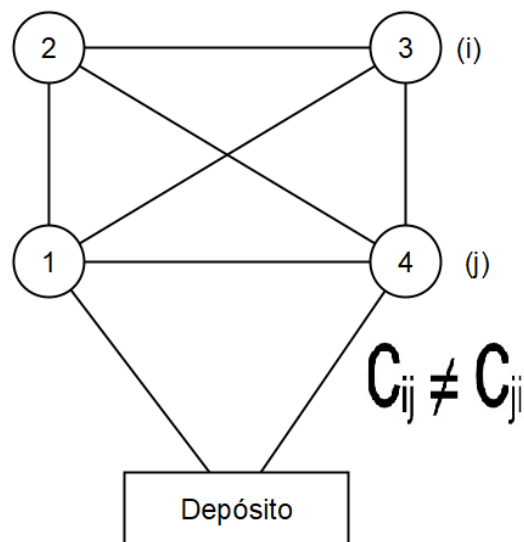


Figura 54. Representación grafica para (ACVRP), tomado de (Toro E. M., 2016)

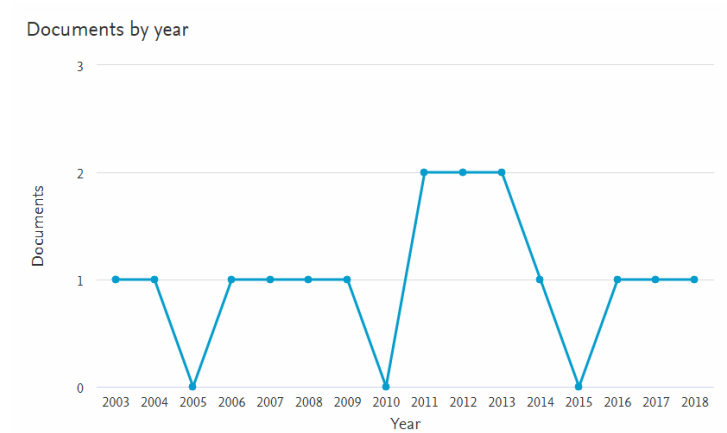


Figura 55. Documentos por año para ACVRP, (Scopus., 11/7/2018)

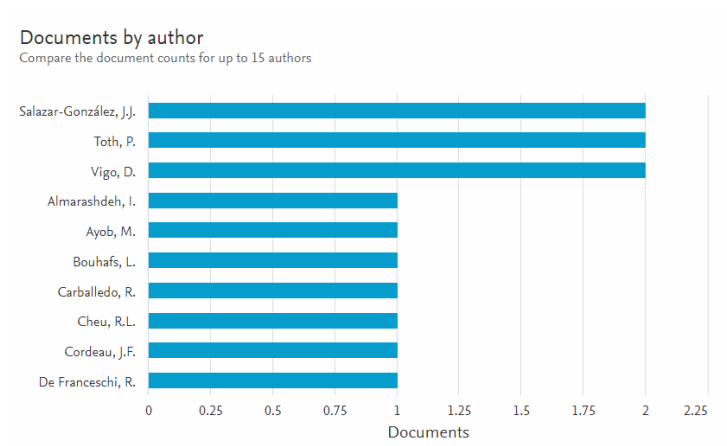


Figura 56. Documentos por autor para ACVR, (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo de arco (ARP) Arc Routing Problem. Este debe encontrar la ruta mas corta a través de todas las vías y retornar a su posición de inicio, figura 56, entre sus aplicaciones se encuentran: recolección de basuras, utilidad de lectura. Relajaciones del modelo y aproximaciones exactas pueden ser encontradas in (Toth & Vigo, 2002). (Lacomme, 2001) Han resuelto el problema usando algoritmos genéticos. (Martinelli, 2011) Ha planteado nuevos límites para instancias de gran escala. 969 fueron los resultados en los últimos diesiocho años, en la base de datos *Scopus*, representados como documentos por año y por autor, figuras 57 y 58.

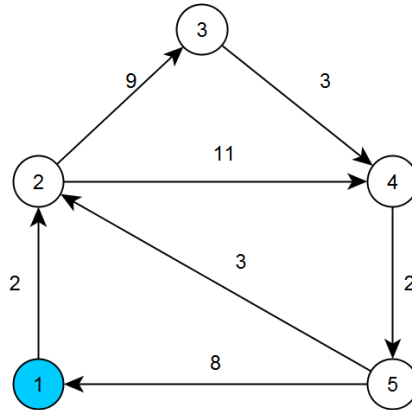


Figura 57. Representación grafica para ARP, figura tomada de (Amaya, 2007)

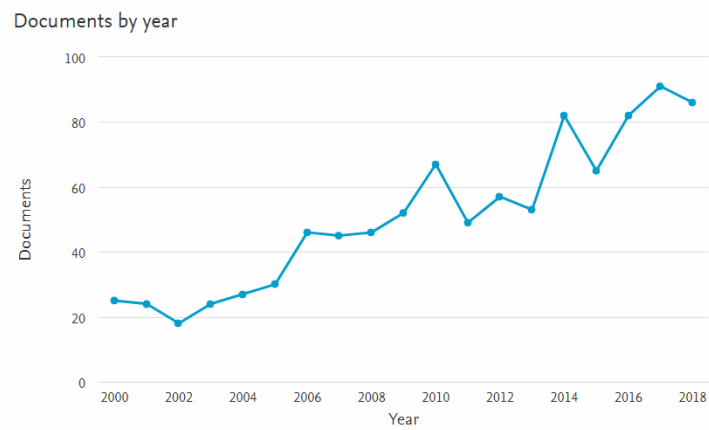


Figura 58. Documentos por año para ARP, (Scopus., 11/7/2018)

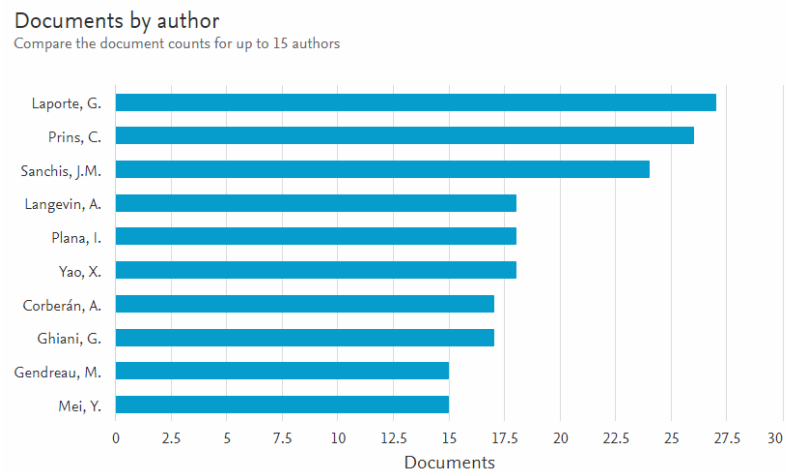


Figura 59. Documentos por autor para ARP, (Scopus., 11/7/2018)

```

graph TD
    D1[D1]
    1((1)) --> 2((2))
    1((1)) --> 3((3))
    1((1)) --> 4((4))
    1((1)) --> 9((9))
    1((1)) --> D1
    2((2)) --> 3((3))
    3((3)) --> 4((4))
    4((4)) --> D1
    5((5)) --> D1
    5((5)) --> 6((6))
    6((6)) --> 7((7))
    7((7)) --> 8((8))
    8((8)) --> D1
    9((9)) --> 10((10))
    9((9)) --> 12((12))
    10((10)) --> 13((13))
    11((11)) --> 13((13))
    12((12)) --> 11((11))

```

La búsqueda realizada para el DCVRP en el buscador *Scopus* arrojó 1.276 documentos relacionados (Scopus., 11/7/2018) como se muestra en las siguientes estadísticas figuras 14 y 15, teniendo en cuenta documentos por año y por autor.

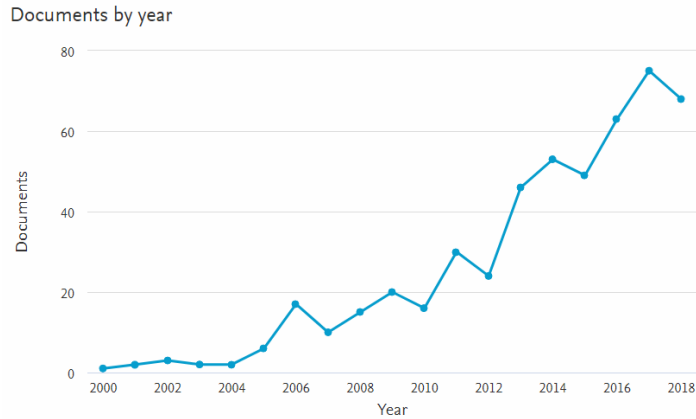


Figura 61. Documentos por año DCVRP (Scopus., 11/7/2018)

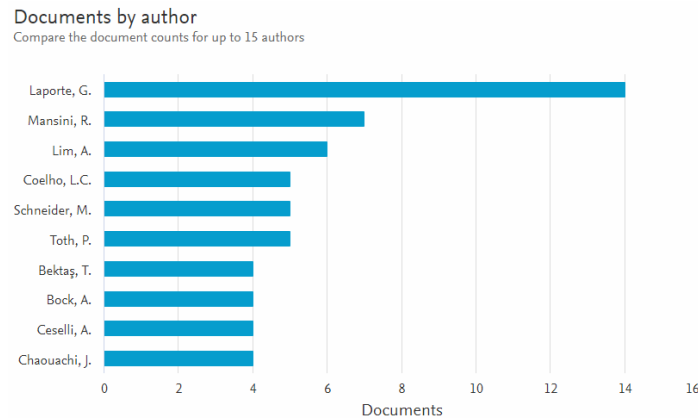


Figura 62. Documentos por autor para DCVRP (Scopus., 11/7/2018)

Problema de marcar un viaje (DARP): *Dial-a-ride Problem* este problema es modelado para representar el transporte para gente de la tercera edad, personas discapacitadas, ambulancias utilizadas en servicios regulares, animales y mercancía, transporte sensible al tiempo, taxis, servicio de mensajería. Se dibujan rutas planificadas o con costos pre-establecidos restringiendo el problema a las necesidades de transporte. La representación grafica se muestra en la figura 62. Los siguientes autores presentaron estudios en este tópico: (Cordeau J. a., 2003) presentan el estado del arte sobre el DARP, (Cordeau J. , 2006) resuelve este problema con un algoritmo de ramas y corte o branch and cut. (Jorgensen, 2006) Realiza un algoritmo genético para resolver el problema. 289 resultados arrojados en la base de datos *scopus*. como lo muestran las figuras 63 y 64

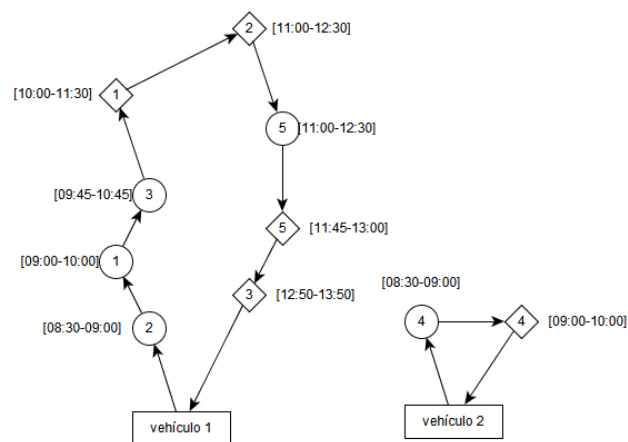


Figura 63. Representación grafica para DARP, tomada de (Cordeau J. a., 2003)

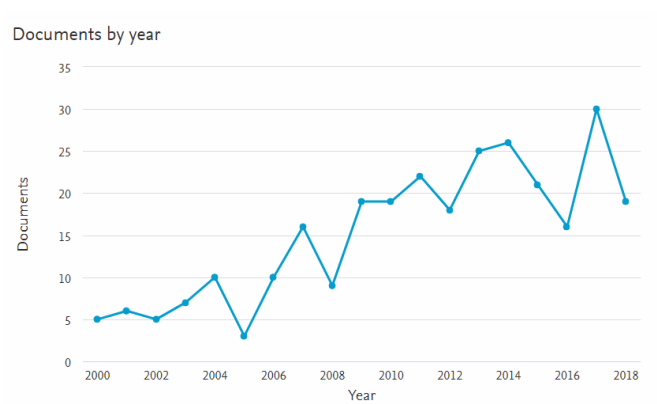


Figura 64. Documentos por año para DARP, (Scopus., 11/7/2018)

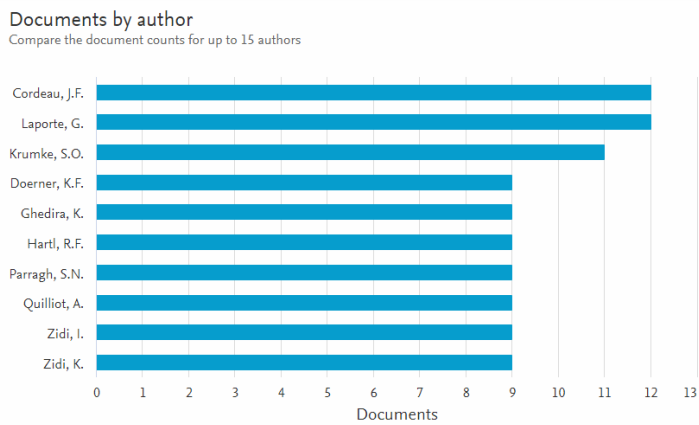


Figura 65. Documentos por autor para DARP, (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular con emisiones (EVRP): *The Emissions Vehicle Routing problem* la minimización de emisiones y el consumo de es el principal objetivo de la función generalizada de costo. El VRP considerando la contaminación ambiental ha sido también llamado problema de ruteo de contaminación (PRP) por (Bektas, 2011), “problema de ruteo de consumo de combustible (FCVRP) por (Xiao, 2012), problema verde de ruteo de vehículos (EVRP) por (Erdogan, 2012)

La base de datos nos arroja 335 documentos para esta temática. Las figuras 65 y 66, perfilan los documentos por año y por autor en los últimos años.

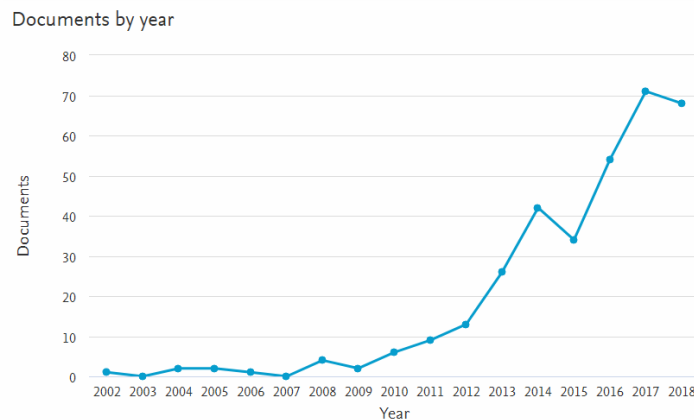


Figura 66 Documentos por año para EVRP, (Scopus., 11/7/2018)

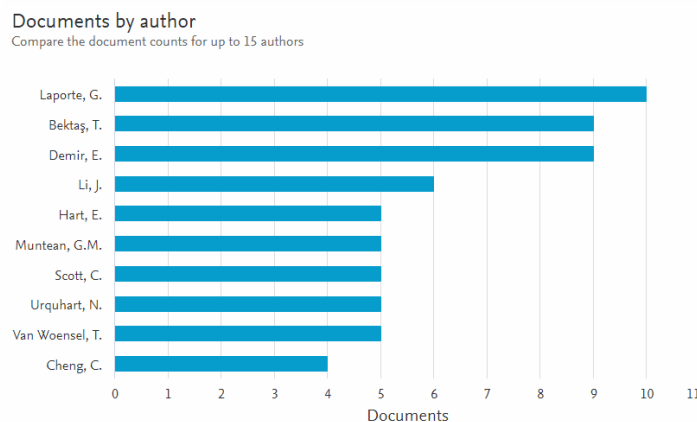


Figura 67. Documentos por autor para EVRP, (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular generalizado (GVRP), *Generalized VRP*. En esta variante, los clientes son divididos en “racimos” o grupos. Si un cliente es atendido, entonces es considerado que el racimo entero fue atendido. Aplicaciones en comunicaciones y redes de distribución han sido reportadas. Sus formulaciones pueden ser encontradas en (Ghiani G. a., 2000); estrategia de solución basada en optimización de colonia de hormigas (ACO) en (Pop, 2008), (Baldacci R. B., 2010) presenta un estudio exhaustivo en GVRP y sus aplicaciones.

Las figuras 67 y 68 muestran 224 resultados para la base de datos *Scopus*, mostrando los documentos por año y por autor, de la siguiente forma:

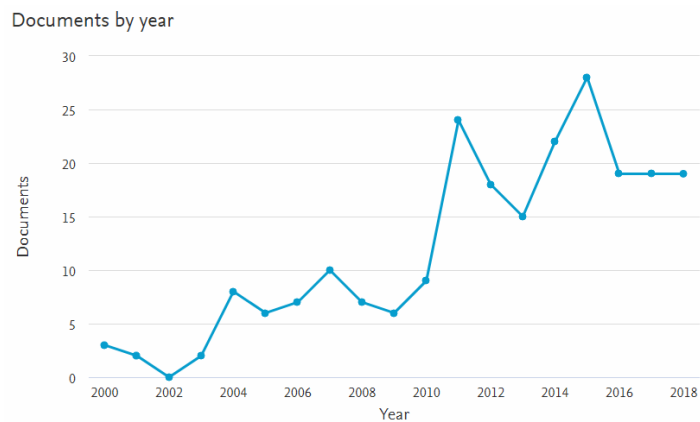


Figura 68. Documentos por año para GVRP, (Scopus., 11/7/2018)

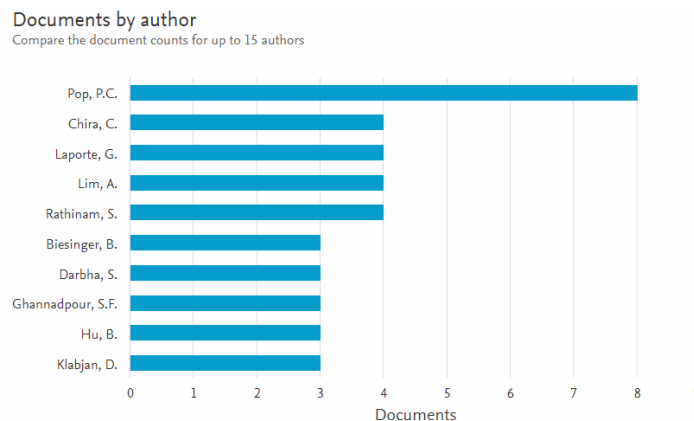


Figura 69. Documentos por autor para GVRP, (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo por locación (LRP): *Location Routing Problem* en este problema son resueltos tres problemas simultáneamente: ubicación de los depósitos, definición de rutas y asignación de rutas hacia

depositos abiertos. (Prins, 2007) Resolvieron el problema usando una relajación lagrangiana con búsqueda granular. (Escobar J. L., 2013); (Contardo Vera, 2005) han resuelto el problema usando mate heurísticas, recientemente (Prodhon & Prins, 2014) analizaron toda la literatura disponible sobre esta variante de VRP y proponenuevas líneas de investigación en esta dirección. Las figuras 69 y 70 muestran los 397 resultados para documentos por año y por autor.

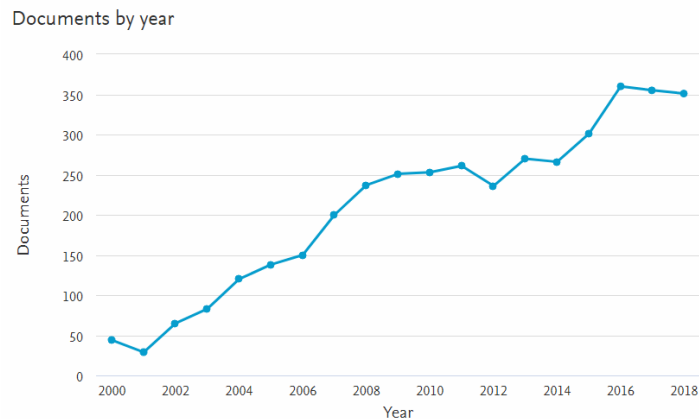


Figura 70. Documentos por año para LRP, (Scopus., 11/7/2018)

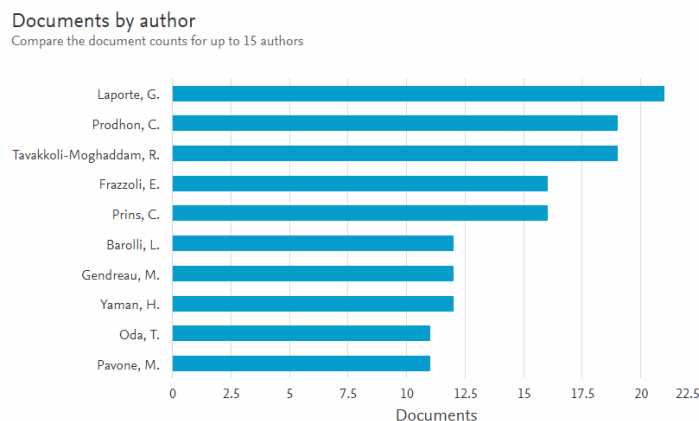


Figura 71. Documentos por autor para LRP, (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular abierto (OVRP) *Open VRP*: el objetivo del OVRP es diseñar un grupo caminos hamiltonianos (rutas abiertas) para atender la demanda del cliente. Sus aplicaciones, entre otras, son: entrega de comidas escolares, rutas escolares de buses, entregas de paquetes a domicilio y entrega de periodicos en trenes. La representación grafica de esta se muestra en la figura 71. (Li F. G., 2007)

proporcionaron un estudio sobre algoritmos para resolver los OVRP. (Li X. L., 2012) proponen un algoritmo de búsqueda tabú basado en memoria adaptativa con arranque multiple para el problema abierto de ruteo vehicular con flota heterogenea fija

Las figuras 72 y 73 nos muestran los documentos por año y por autor, para un total de 387 documentos relacionados en la base de datos *scopus*.

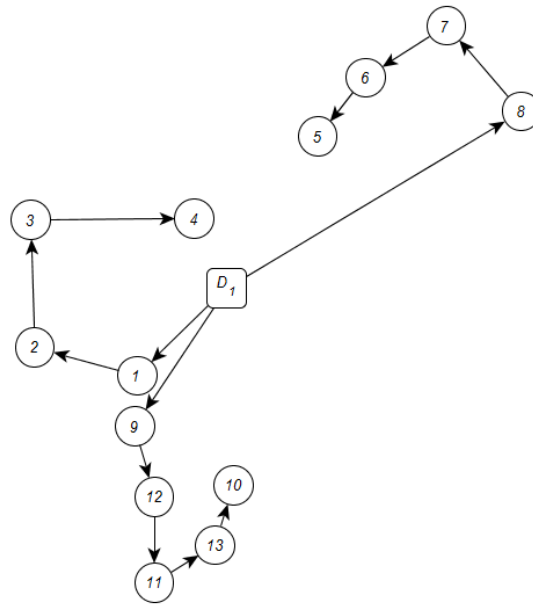


Figura 72. Representación grafica para OVRP, imagen tomada de (Toro E. M., 2016)

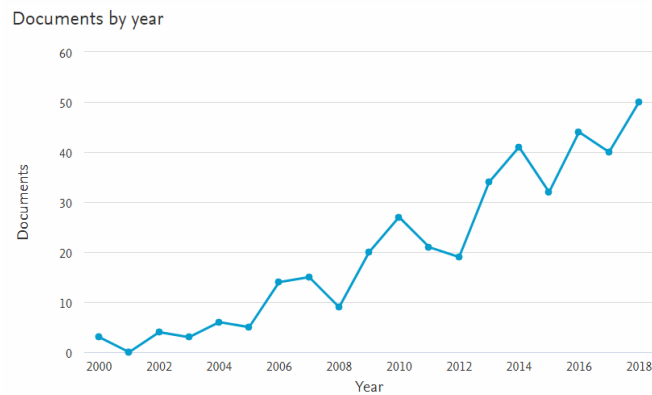


Figura 73. Documentos por año para OVRP, (Scopus., 11/7/2018)

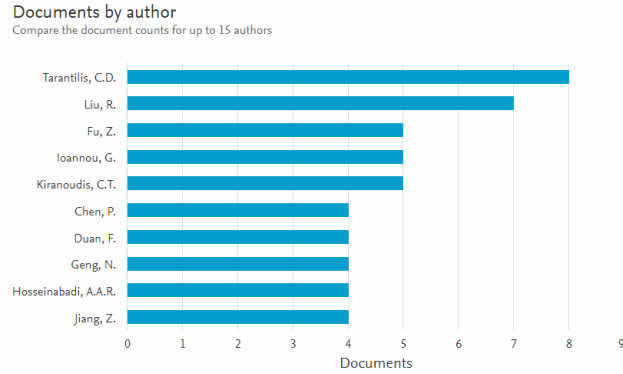


Figura 74. Documentos por autor para OVRP, (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular con tiempo dinamico real (RTDVRP) *Real time dynamic VRP* es una extension del VRP con ventanas de tiempo (VRPTW), considera condiciones de trafico, asignación dinámica del vehículo. (Ghiani G. G., 2003) Presentan algoritmos y estrategias de cómputo paralelas. (Giagli, 2004) Presenta tecnologías móviles aplicadas al problema. 400 fueron los resultados en la búsqueda de literatura relacionada, se muestran a continuación en las figuras 74 y 75.

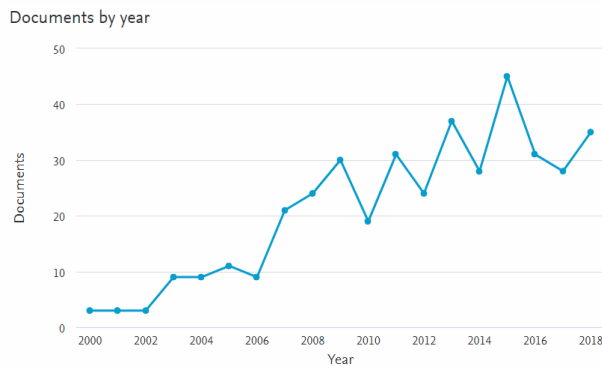


Figura 75. Documentos por año para RTDVRP, (Scopus., 11/7/2018)

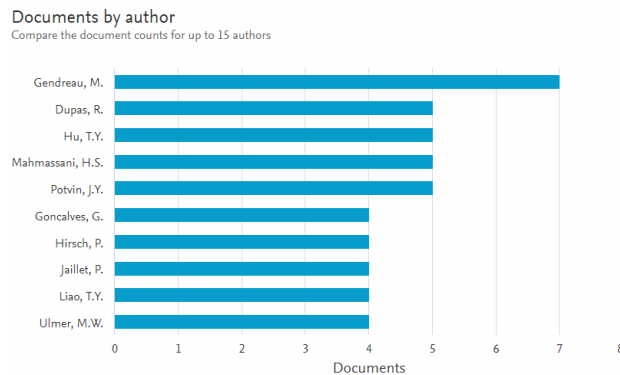


Figura 76. Documentos por autor para RTDVRP, (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular dependiente de tiempo (TDVRP) *Time Dependent VRP*. El tiempo de viaje entre dos clients, o entre un cliente y un deposito, depende de la distancia entre los puntos y el momento del día que sea considerado. (Malandraki, 1992) presenta un estado del arte; (Donati, 2008) usan *ant colony optimizartion*, ACO o algoritmo de colonia de hormigas, para resolver el problema. La literatura nos muestra 372 resultados, búsquedas por año y por autor se muestran en las figuras 76 y 77.

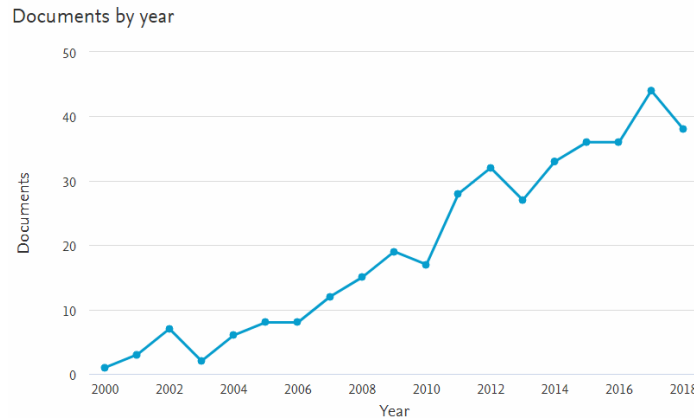


Figura 77. Documentos por año para TDVRP, (Scopus., 11/7/2018)

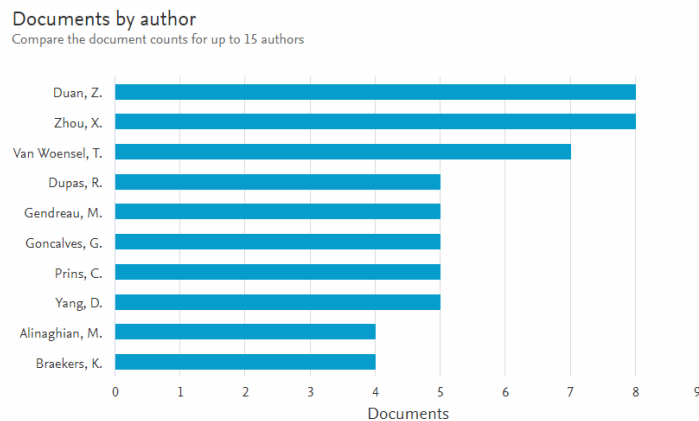


Figura 78. Documentos por autor para TDVRP, (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular con capacidad y sobre arboles (TCVRP): *Capacitated VRP on trees.* consiste en determinar la coleccion de rutas vehiculares, empezando y terminando en el depósito, tal que: el peso asociado con cualquier vértice dado es recolectado por exactamente un vehiculo. Este tipo de problema puede ser encontrado en vías férreas, ríos, y redese de vías rurales. Su ilustración grafica se muestra en la figura 78. El problema fue formulado y resuelto a traves de heurísticas en el documento presentado por (Labbé, 1991). (Mbaraga, 1999) Lo resolvieron de manera exacta. Las figuras 80 y 81 muestran los documentos por año y por autor, para un total de 49 resultados.

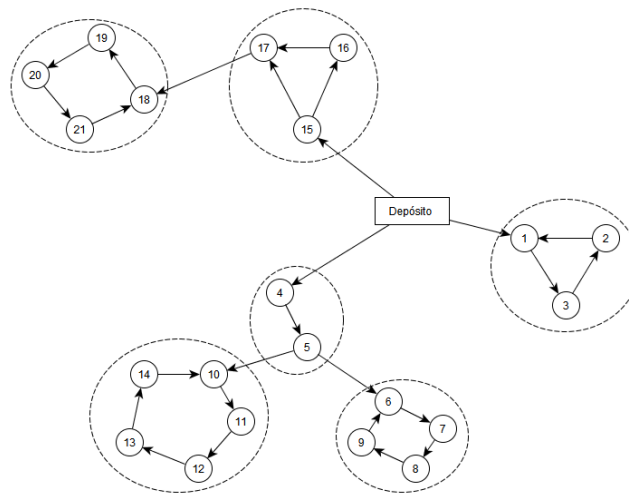


Figura 79. Representación grafica para TCVRP, ilustración tomada de (Chandran, 2007)

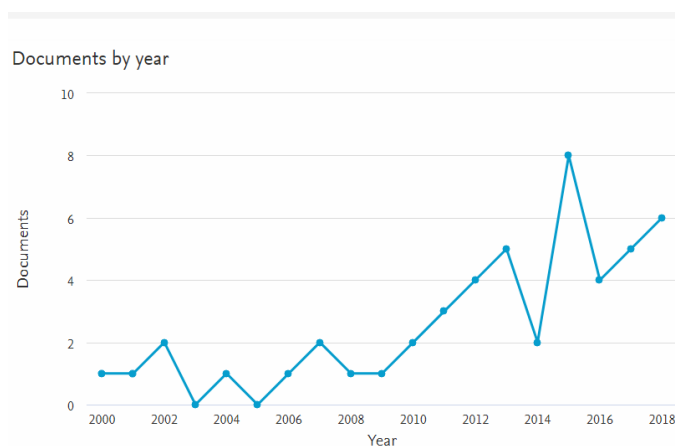


Figura 80. Documentos por año para TCVRP, (Scopus., 11/7/2018)

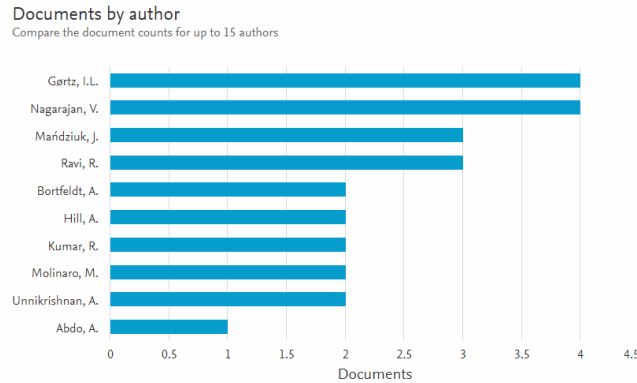


Figura 81. Documentos por autor para TCVRP, (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular con camión y remolque (TTRP): *Truck and Trailer routing Problem.* Llamado el problema de ruteo de camión y remolque, es una variante de el bien conocido problema de ruteo vehicular. A diferencia del VRP, en el TTRP, los clientes son atendidos por una flota de camiones y remolques. Debido a algunas restricciones practicas, alguns clientes pueden ser únicamente atendidos por un solo camión. El otro cliente puede ser atendido por un camión o un remolque de este, como se muestra en la figura 81. Una heurística de aproximación fue presentada por (Caramia, 2010) (Villegas, 2010) presentaron una metaheurística hibrida. Los estudios realizados en los últimos años presentan 74 resultados, estos son mostrados en las figuras 82 y 83.

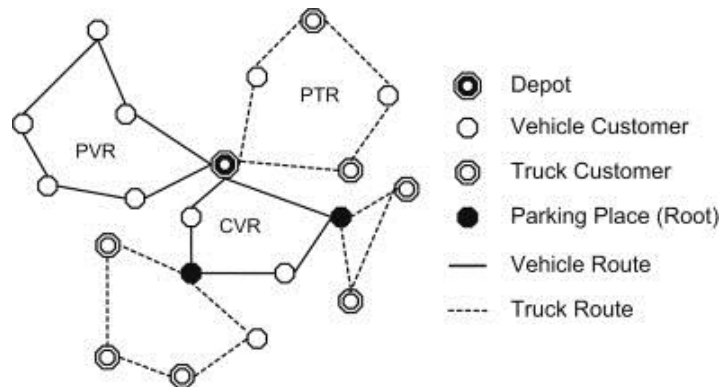


Figura 82. Representación grafica para TTRP, tomado de (Chou, 2009)

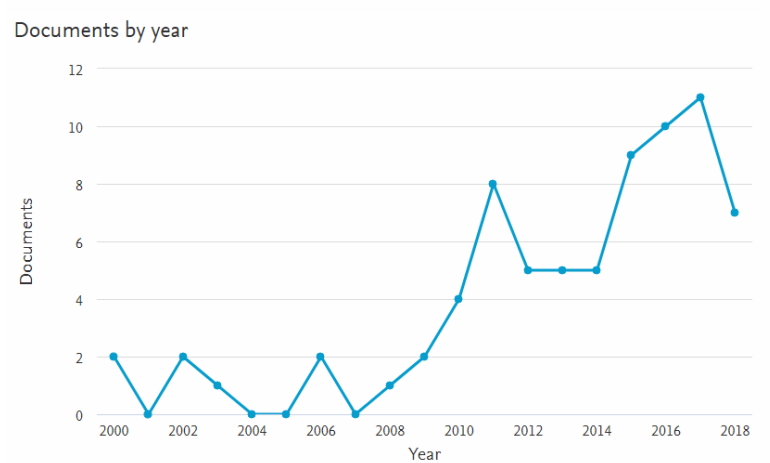


Figura 83. Documentos por año para TTRP, (Scopus., 11/7/2018)

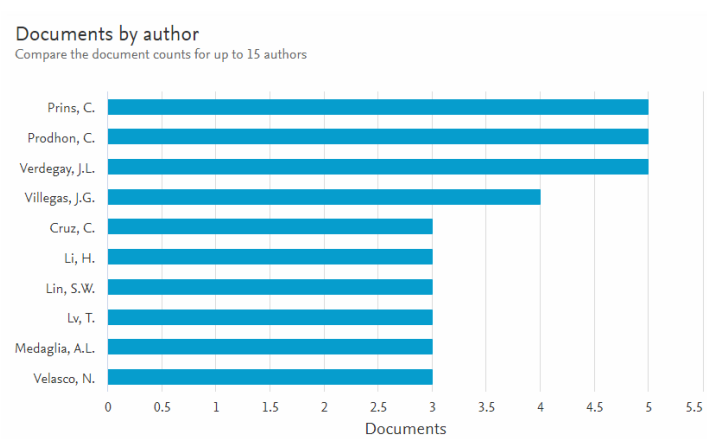


Figura 84. Documentos por autor para TTRP, (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular con recogidas y entregas (VRPPD): *VRP with Pick Up and Delivery*. es definida sobre una red, donde algunos nodos representan entregas a los clientes, quienes esperan entregas desde otro deposito, y otros nodos representan recogidas de clientes que tienen suministros disponibles para ser recogidos y transportados a un deposito, figura 84. (Nagy, 2003) Proponen diferentes algoritmos para resolver el problema. El artículo mas citado es el de (Chen, 2006) en este trabajo el problema fue resuelto usando heurísticas híbridas. (Subramanian, 1899-1911) propouso una heurística paralela. Esta variante es encontrada en el buscador *Scopus* con 236 resultados, documentos por año (figura 85), documentos por autor (figura 86).

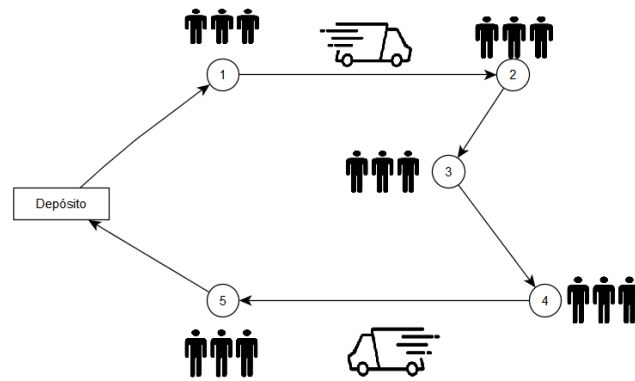


Figura 85. Representacion grafica para VRPPD. (Sophie N. Parragh, 2006)

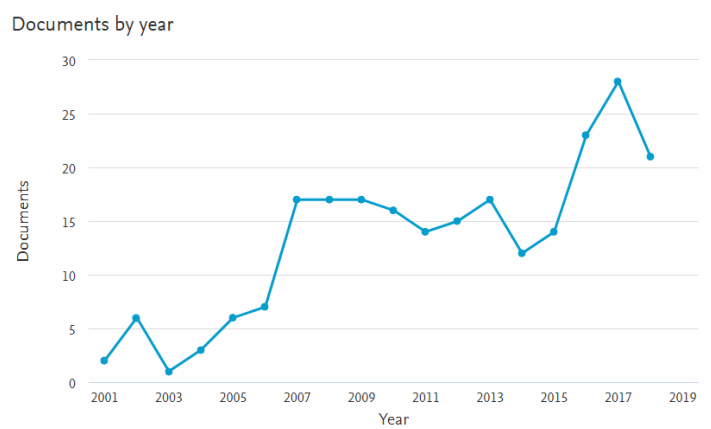


Figura 86. Documentos por año para VRPPD, (Scopus., 11/7/2018)

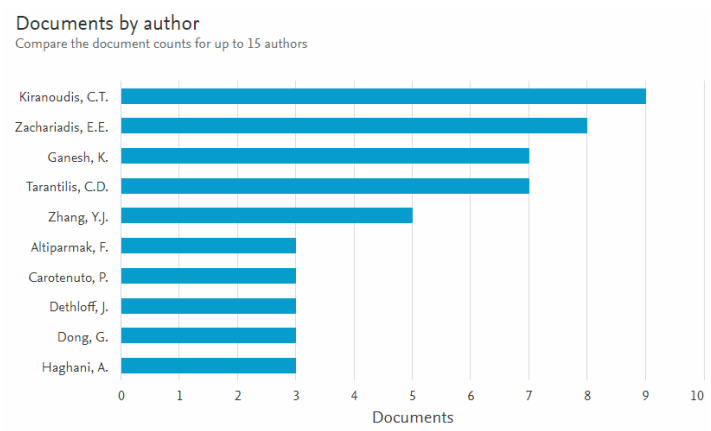


Figura 87. Documentos por autor para VRPPD, (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular con flota propia o externa (VRPPC): *VRP with Private Fleet Common Carrier*. En este problema los clientes pueden ser atendidos también por su propia flota de vehículos o asignado a un transportador común externo, su representación mostrada en la figura 87. El peor caso ocurre si la demanda excede el total de la capacidad de la propia flota o si esta es más económica de hacer con flota externa. (Naud, 2009) Proporcionaron una búsqueda tabu con cadenas de expulsión para resolver este problema; (Euchi, 2011) usaron un algoritmo evolucionario para abordar el VRPPC. Se muestran 15 resultados entre documentos por año y por autor (figuras 89 y 90).

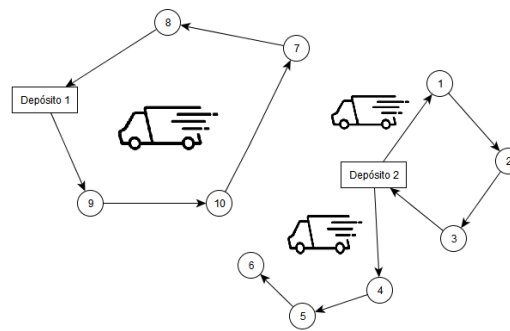


Figura 88. Representación gráfica para VRPPC, tomado de (Toro E. , 2016)

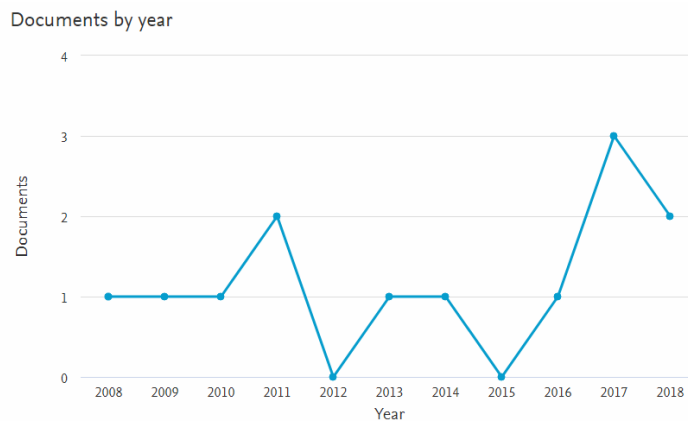


Figura 89. Documentos por año para VRPPC, (Scopus., 11/7/2018)

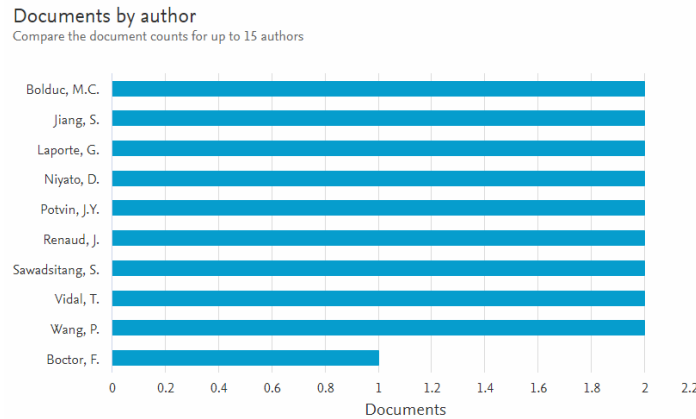


Figura 90. Documentos por autor para VRPPC, (Scopus., 11/7/2018)

Problema de ruteo vehicular con programación (VSRP), *Vehicle Scheduling routing Problem*. el problema es resuelto en dos etapas: la definición de rutas y otras asignaciones de la tripulación a las rutas, figura 90, (Thompson, 1993) presentaron un algoritmo de búsqueda de vecindad llamado algoritmos de transferencia cíclica. (Qiu, 2002) Presentaron algunos algoritmos para resolver el problema considerando vehículos guiados automáticamente. (Minocha, Tripathi, & Mohan, 2011) Proponen un algoritmo el cual incorpora una tecnica de búsqueda local con algoritmo genético, una aproximacion para resolver VRPTW porque este es un ejemplo de programación en un ambiente restrictivo. Entonces, el VRP y programación con ventanas de tiempo (VRSPTW): en la función objetivo, los costos incluyen una variabe de tiempo de espera cuando el vehículo arriba demasiado pronto a una locación. (Koskosidis, 1982) Presentaron una heurística para abordar el problema. Uno de los trabajos mas importantes en este tópico es desarrollado por (Solomon, 1987).

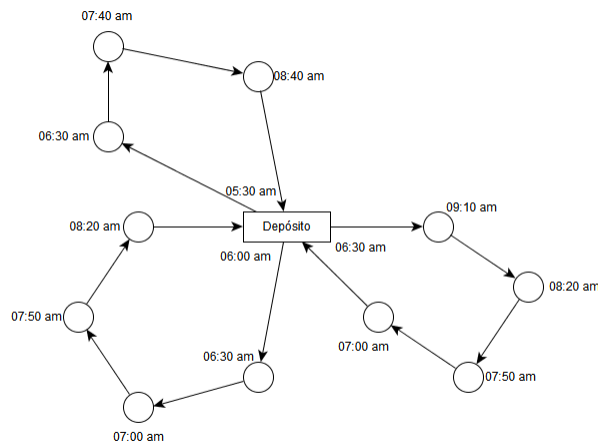


Figura 91. Representación grafica para VSRP. Tomado de (Zhang, 2018)

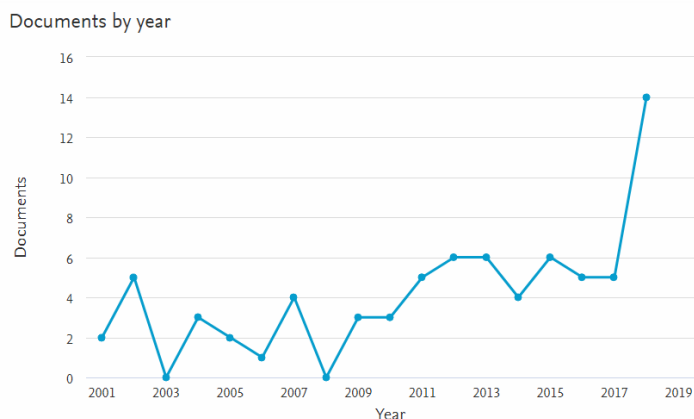


Figura 92. Documentos por año para VSRP, (Scopus., 11/7/2018)

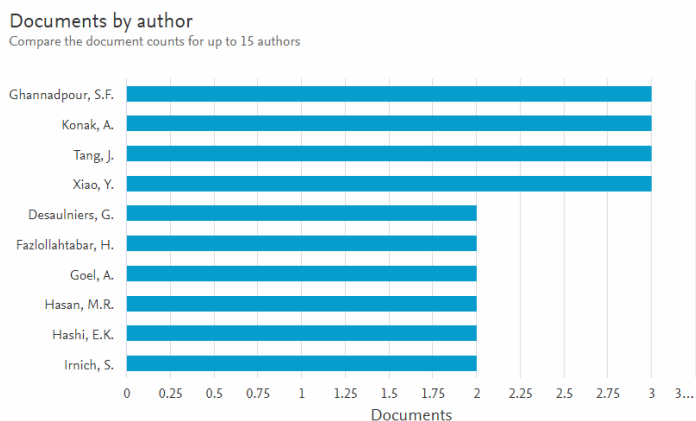


Figura 93. Documentos por autor para VSRP, (Scopus., 11/7/2018)

Problema de Localización y Ruteo considerando restricciones de capacidad (CLRP), *Capacitated Location Routing Problem*. En los problemas típicos de localización, uno de los deseos es ubicar los centros de distribución (depósitos) y conectar directamente los clientes a cada depósito a un costo mínimo. En sentido contrario en los VRPs el objetivo es diseñar un conjunto de rutas que inician y terminan en los depósitos. Los LRPs representan un enfoque integrado, donde se desean combinar las decisiones de localización de depósitos y ruteo de vehículos. [Ulukan and Demircioglu, 2015] Estos problemas tienen muchas aplicaciones en diferentes frentes económicos y se encuentran en: localización de centrales y ruteo de documentos clasificados de las fuerzas armadas [Chan and Baker, 2005], distribución de documentos en ciudades [Lin and Kwok, 2006], planeación y operación logística militar [Burks, 2006], instalación de centrales de incineración de basuras y el ruteo de recolección de las mismas [Lopes et al., 2008], cadena de suministro de maderas [Marinakis and Marinaki, 2008b], distribución de cadenas de supermercados [Ambrosino et al., 2009], distribución de repuestos de vehículos [Schittekat and Sorensen, 2009], distribución

2012]. Figuras 94 y 95 presentan las estadísticas de la base de datos *Scopus*, con 235 resultados para (CLRP).

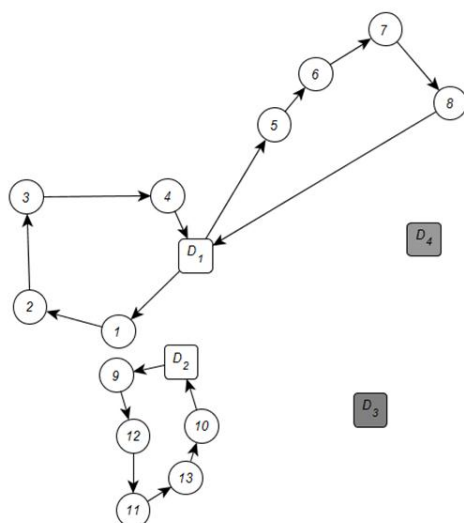


Figura 94. Representación grafica para (CLRP), tomado de (Toro E. M., 2016)

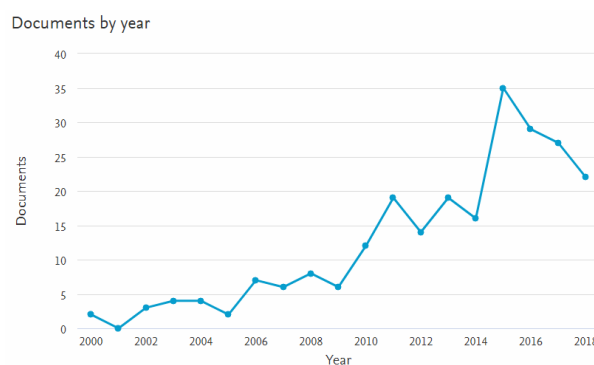


Figura 95. Documentos por año para (CLRP), (Scopus., 11/7/2018)

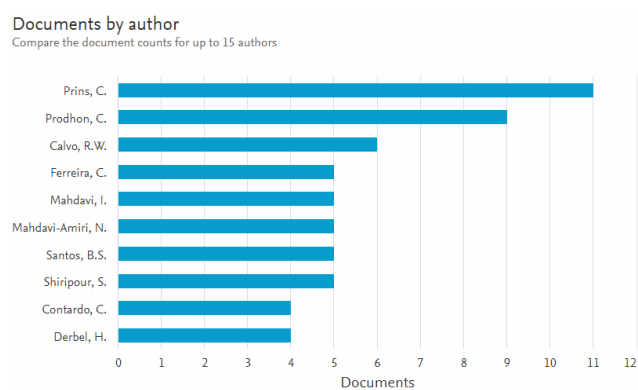


Figura 96, documentos por autor para (CLRP), (Scopus., 11/7/2018)

En (Toro E. M., 2016) se mencionan otros problemas que son a su vez, variantes que consideran aspectos tales como propiedades de escenarios y características físicas:

Propiedades de escenario: numero de paradas en la ruta, restricciones asociadas con la partición de carga, cantidades determinísticas o estocásticas para la demanda del cliente, tiempo requerido por los consumidores, sitios de servicio, tiempos de espera, estructura de las ventanas de tiempo, tiempo del horizonte, tipos de nodos (demanda del suministro, o ambos) y consideración de los efectos ambientales.

Características físicas del problema: diseño de la red de transporte, autorización para la orientación de arcos (unidireccional o bidireccional), la locación de los clientes (nodos o vértice), numero de depósitos, número y tipos de vehículos disponibles, restricciones de capacidad, tiempo de recorrido, costos de recorrido, elementos transportados (personas, animales, cajas, etc.).

El VRP ha sido estudiado en una amplia variedad de publicaciones. (Bodin L. , 1974) Presentó la estructura taxonómica del problema sin considerar las demandas actuales. (Bodin & Golden, 1981) Describen una taxonomía del problema de ruteo y asignación, en este ranking 13 prestaciones son propuestas. (Laporte G. , 1991) Introduce una clasificación de los métodos exactos de partición en tres categorías:

- i) Métodos de búsqueda directa de árbol
- ii) Dinamico
- iii) Programación entera lineal

(Fukasawa et al., 2004) presentan un robusto algoritmo de ramas y cortes y precio (Branch and cut and Price) para el CRVP. (Sbihi et al., 2007) Presentaron una introduccion a los problemas de logistica verde que son relevantes

Para el ruteo de vehículos y la programación, incluyendo discusiones sobre los objetivos ambientales que deberían ser considerados. (Yeun, 2008) Presentaron una revisión del estado del arte desde 1986 al 2006 la cual incluye VRPTW, CVRP, VRPPD. (Eksioglu B et al., 2009) presentaron la nomenclatura del VRP, incorporando todas sus variantes y asociadas con la literatura disponible hasta la fecha. En (Kumar, 2012) se presentan las principales variantes del CVRP y el VRPTW problema enmarcado en la cadena de suministro, las contribuciones de diferentes autores son clasificadas dentro de tres categorías, ehurísticas, metaheurísticas y métodos híbridos. Finalmente (Vidal, 2013) analizaron en detalle 64 metaheurísticas exitosas aplicadas a 15 variantes de VRP, ante todo, identificando el o del algoritmo y sus principales características en términos de: espacio de solución, estrategias de vecindario, caminos de búsqueda, mecanismos de control de memoria, estrategias híbridas y el paralelismo y la descomposición de los problemas (Toro E. M., 2016).

Problema de localización y ruteo con flota propia y subcontratada (CLRPPC), *Capacitated Location Routing Problem With Private Fleet And Common Carrier*. Para finalizar, Se presenta un modelo matemático flexible que puede ser usado para resolver diferentes variantes del problema de ruteo. Este modelo puede ser usado como base para plantear versiones abiertas, cerradas y mixtas (rutas abiertas y cerradas) dentro de la temática del VRP (Toro E. M., 2017). Dicho modelo matemático obedece a una variante del VRP tipo CLRPPC, que, en determinados casos permite la opción de adaptar el modelo matemático a diferentes variantes que incluye los problemas de ruteo de vehículos sin y con retorno al depósito y planteados de manera separada o integrada. Los primeros se constituyen en las versiones abiertas (open), donde la ruta inicia en el depósito y terminan en el último cliente que es atendido, los segundos en las versiones clásicas, donde las rutas empiezan y terminan en un depósito, los terceros, es una forma híbrida de los dos anteriores, en los cuales se combina el ruteo de vehículos con y sin retorno al depósito. En estos se estudia el uso combinado de vehículos propios y subcontratados. Adicionalmente es posible plantear variantes que consideran múltiples depósitos tal como el MDVRP y el CLRP. Otro aspecto relevante es la flexibilidad de este planteamiento matemático debido a que es posible resolver abordajes mono y multi-objetivo, que pueden optimizar costos, minimización de efectos contaminantes y balanceo de carga de trabajo. (Galindres-Guancha, 2018), (Granada-Echeverri, 2019)

El problema de localización y ruteo considerando restricciones de capacidad atendida con flota propia y flota subcontratada, es un área de interés que se considera como una nueva línea de investigación (Prodhon & Prins, 2014). Este caso se puede observar cuando el nivel de actividades aumenta, como en el caso de la industria de servicios, donde aparecen de forma reiterada actividades como el mantenimiento y reparación de la flota de vehículos, que hacen que la flota no sea suficiente para atender la demanda de los clientes. Esta situación también se presenta en la logística de desastres, donde la demanda desborda la capacidad de atención con los recursos disponibles. De acuerdo a la revisión de la literatura es un problema que apenas empieza a ser estudiado.

Este problema aparece cuando la flota propia es insuficiente para atender la totalidad de la demanda o una parte de los vehículos de la flota propia está inactiva a causa de actividades de mantenimiento y reparación. El objetivo del CLRPPC es minimizar los costos de apertura de los depósitos, el costo de uso de los vehículos propios y los costos variables asociados a la utilización de las rutas recorridas por la flota propia o por la flota subcontratada.

Nomenclatura.

Sets

| | |
|-----|--|
| I | Conjunto de centros de distribución (depósitos). |
| J | Conjunto de clientes. |
| V | Conjunto de nodos $V = I \cup J$ |

Parámetros.

| | |
|----------|--|
| O_i | Costo de apertura del centro de distribución. i |
| W_i | Capacidad del centro de distribución. i |
| F | Costo fijo asociado a cada vehículo propio utilizado en la operación. |
| Q | Máxima carga que puede ser transportada por un vehículo. |
| D_j | Demanda de cada cliente $j \in J$ |
| c_{ij} | Costo de viajar entre los nodos i y j |
| P | Factor de penalización aplicado a cada arco cuando es transitado usando un vehículo subcontratado. |
| NV_a | Numero de vehículos disponibles de la flota propia. |

Variables.

| | |
|----------|--|
| x_{ij} | Variable binaria que se activa cuando el camino entre los nodos $i, j \in V$ es recorrido por un vehículo propio. |
| s_{ij} | Variable binaria que se activa cuando el camino entre los nodos $i, j \in V$ es recorrido por un vehículo subcontratado. |
| y_i | Variable binaria que indica la apertura del centro de distribución $i \in I$ |
| f_{ij} | Variable binaria que define si el consumidor ubicado en el nodo $j \in J$ es atendido por una ruta que inicia en el centro de distribución $i \in I$ |
| z_j | Variable binaria que determina si el consumidor ubicado en el nodo $j \in J$ es el ultimo de la ruta en ser atendido |
| a_{ij} | Variable binaria que indica si el vehículo usa el camino desde el nodo j al centro de distribución ubicado en el nodo i . |
| t_{ij} | Variable continua que indica la cantidad de carga transportada entre los nodo recorridos por la flota propia i y j |
| l_{ij} | Variable continua que indica la cantidad de carga transportada entre los nodos recorridos por la flota subcontratada i y j . |

$$\min = \sum_{i \in I} O_i y_i + \sum_{\substack{i \in I \\ j \in J}} F a_{ij} + \sum_{i, j \in V} c_{ij} x_{ij} + \sum_{\substack{i \in I \\ j \in J}} c_{ij} a_{ij} + P \sum_{\substack{i \in V \\ j \in V}} c_{ij} s_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in V} x_{ij} + \sum_{i \in V} s_{ij} = 1 \quad \forall j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{k \in J} x_{jk} + \sum_{i \in I} a_{ij} = \sum_{i \in V} x_{ij} \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = \sum_{j \in J} a_{ij} \quad \forall i \in I \quad 4)$$

$$\sum_{k \in J} s_{jk} \leq \sum_{i \in V} s_{ij} \quad \forall j \in J \quad 5)$$

$$x_{ij} + x_{ji} + s_{ij} + s_{ji} \leq 1 \quad \forall i, j \in V \quad 6)$$

$$\sum_{\substack{i \in V \\ i \neq j}} t_{ij} + 1_{ij} = \sum_{\substack{k \in V \\ k \neq j}} (t_{jk} + 1_{jk}) + D_j \quad \forall j \in J \quad 7)$$

$$\sum_{\substack{i \in V \\ j \in V}} s_{ij} = \text{card}(J), \quad \forall j \in J \quad 8)$$

$$\sum_{i \in I} f_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in J \quad 9)$$

$$t_{ij} \leq Qx_{ij} \quad \forall i, j \in V \quad 10)$$

$$I_{ij} \leq QS_{ij} \quad \forall i, j \in V \quad 11)$$

$$\sum_{j \in J} t_{ij} + I_{ij} \leq w_i y_i \quad \forall j \in J \quad 12)$$

$$\sum_{i \in V} s_{ij} + \sum_{k \in V} x_{jk} = 1 - z_j \quad \forall j \in J \quad 13)$$

$$1 + a_{ij} \geq f_{ij} + z_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad 14)$$

$$-(1 - x_{ju} - x_{uj}) \leq f_{ij} - f_{iu} \quad \forall i \in I, \forall j, u \in V \quad 15)$$

$$f_{ij} - f_{iu} \leq (1 - x_{ju} - x_{uj}) \quad \forall i \in I, \forall j, u \in V \quad 16)$$

$$f_{ij} \geq x_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad 17)$$

$$\sum_{i \in I} y_i \geq \sum_{j \in J} D_j / \sum_{i \in I} w_i \quad 18)$$

$$\sum_{\substack{i \in J \\ i \in I}} x_{ij} + s_{ij} \leq \sum_{j \in J} D_j / Q \quad 19)$$

$$\sum_{\substack{i \in I \\ j \in J}} a_{ij} \leq NV_a \quad 20)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V \quad 21)$$

$$s_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V \quad 22)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I \quad 23)$$

$$f_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in V \quad 24)$$

$$z_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad 25)$$

$$a_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad 26)$$

$$t_{ij} \in R \quad \forall i, j \in V \quad 27)$$

$$I_{ij} \in R \quad \forall i, j \in V \quad 28)$$

La función objetivo 1) minimiza los costos de operación, los cuales corresponden a la suma de los costos de apertura de los centros de distribución, costos de apertura de la ruta, costos variables por utilización de los arcos por la flota propia o bien por la flota subcontratada.

Un nodo de demanda j debe tener un arco de llegada que lo conecta a la ruta, bien sea un arco recorrido por la flota propia o por la flota subcontratada, esto se representa en 2), 3) indica que la suma de los arcos de salida de un nodo de demanda es igual a la suma de los arcos de entrada; pudiendo ser un arco normal x o un arco de retorno al centro de distribución a , es decir si se llega a un nodo con una ruta propia, entonces se sale con una ruta propia; 4) garantiza que para un depósito i el número de arcos de salida x debe ser igual al número de arcos de llegada a ; 5) asegura que si se sale de un nodo con una ruta subcontratada es necesario llegar con una ruta subcontratada, siendo posible que se llegue al nodo pero no se salga de él (sería un nodo terminal de la ruta subcontratada); 6) evita la duplicación de los arcos, define la orientación de un arco, es decir, si el sentido es de i para j o de j para i . La restricción 7) representa el balance de flujos para las rutas propias y para las rutas subcontratadas; 8) identifica los arcos activos que generan topologías radiales; 9) garantiza que la demanda de una ruta debe ser conectada a un centro de distribución; 10) limita el flujo por una ruta propia de acuerdo a la capacidad de los vehículos y a la variable que determina el uso de este tipo de ruta. La restricción 11) limita el flujo por una ruta subcontratada de acuerdo a la capacidad de los vehículos y a la variable que determina el uso de este tipo de ruta; 12) limita los flujos que salen de un centro de distribución de acuerdo a su capacidad y a la decisión de construir ese centro de distribución; 13) define un nodo terminal para rutas propias (identificadas con $z=1$) cuando no existen arcos de salida para ese nodo de demanda, desde que no se llegue con un arco de ruta subcontratada. Si j es un nodo terminal, entonces la restricción 14) obliga a que exista un arco de retorno. En las figuras 93 y 94 se aprecia el comportamiento de la variable z de acuerdo a los valores que puede asumir.

Si $z=0$ indica que el nodo j visitado no es terminal.

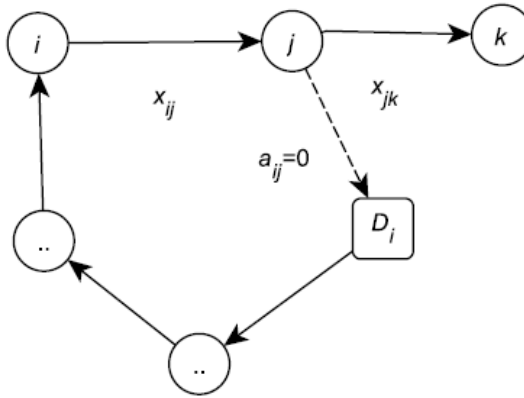


Figura 97. j no es un nodo terminal. (Toro E. M., 2016)

Si $z=1$ se indica que el nodo visitado es un nodo terminal.

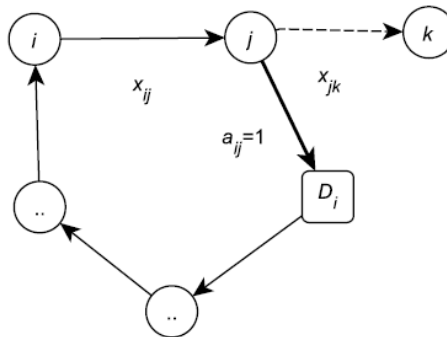


Figura 98. j es nodo terminal. (Toro E. M., 2016)

Las restricciones 15) y 16) para los arcos activos propios, identifican a través de la red el nodo de inicio de la ruta propia para activar el arco de retorno al centro de distribución. Si el arco entre el centro de distribución i y la demanda j está activo, entonces se garantiza que el nodo j está conectado con el centro de distribución i ($f_{ij}=1$), esto se expresa en 17). La restricción 18) determina un límite inferior para el número de centros de distribución que deben ser construidos de acuerdo con la suma de las demandas y con la capacidad de los centros de distribución; 19) garantiza que el número de rutas sea suficiente para atender la demanda; 20) establece el máximo número de rutas atendidas por la flota propia; 21) – 26) definen la naturaleza binaria de las variables, x_{ij} , s_{ij} , y_i , f_{ij} , z_j y a_{ij} . Finalmente 27) y 28) definen las variables t_{ij} y l_{ij} como continuas y representan la cantidad de flujos de mercancías que se desplazan entre el nodo i y j por las rutas propias o subcontratadas respectivamente.

RESULTADOS.

Como se muestra en la tabla 2. el VRP es el problema más estudiado en la literatura, a partir de él se inician todas las aproximaciones de las diferentes variantes y constituyen el problema base a resolver.

En este problema se considera un depósito y un conjunto de clientes que debe ser atendido, luego de acuerdo a las condiciones de operación van apareciendo variantes donde se incluyen aspectos como ventanas de tiempo VRPTW, entregas y recogidas de forma simultaneas VRPB, considerando elementos estocásticos (SDVRP), efectos contaminantes (EVRP). Cuando aumenta el nivel de operación y se quiere atender de manera oportuna a los clientes aparece el MDVRP como alternativa de solución, a este nivel de operación se le han agregado todas las mismas condiciones que se han considerado para operación con un depósito. Cuando además aparecen situaciones como la localización de depósitos, se plantea el CLRP que representa una combinación del problema de localización de depósitos, facility location problem (FLP) y el MDVRP. En la medida en que se requiera representar mejor los aspectos reales del transporte logístico aparecen restricciones adicionales que dan lugar a nuevas variantes y estos aspectos representan mayor complejidad en la solución de los mismos.

| Problema | Número de enlaces |
|--|-------------------|
| VRP (<i>vehicle routing problem</i>) | 9914 |
| Homogéneos | |
| CVRP (<i>Capacitated Vehicle Routing Problem</i>) | 1276 |
| VRPTW (<i>Vehicle Routing Problem with Time Windows</i>) | 2332 |
| VRPTD (<i>VRP with time deadlines</i>) | 65 |
| VRPMTW (<i>VRP with multiple time Windows</i>) | 385 |
| VRPB (<i>Vehicle routing problems with backhauls</i>) | 145 |
| SDVRP (<i>Split Delivery VRP</i>) | 214 |
| Heterogéneos | |
| VRPHF (<i>VRP with Heterogeneous Fleet</i>) | 361 |
| PVRP (<i>Periodic VRP</i>) | 182 |
| RTDVRP (<i>Real Time Dynamic VRP</i>) | 400 |
| MTVRP (<i>Multi-Trip VRP</i>) | 528 |
| MDVRP (<i>Multi-Depot Vehicle Routing Problem</i>) | 382 |
| MCVRP (<i>multiple capacity VRP</i>) | 225 |
| MOVRP (<i>multi-objective VRP</i>) | 913 |
| SVRP (<i>stochastic vrp</i>) | 754 |
| Otras Variantes | |
| 2E-VRP(<i>Two-Echelon Vehicle Routing Problem</i>) | 115 |
| ACVRP (<i>Asymmetric capacitated VRP</i>) | 32 |
| DCVRP (<i>Distance-Constrained Capacitated Vehicle Routing Problem.</i>) | 502 |
| ARP (<i>Arc Routing Problem</i>) | 969 |
| DARP (<i>Dial a ride problem</i>) | 289 |
| EVRP (<i>The emissions vehicle routing problem</i>) | 335 |
| GVRP (<i>Generalized VRP</i>) | 224 |
| LRP (<i>Location Routing Problem</i>) | 397 |
| OVRP (<i>Open Vehicle routing problem</i>) | 387 |

| | |
|--|-----|
| RTDVRP (<i>Real time dynamic VRP</i>) | 400 |
| TDVRP (<i>Time dependent VRP</i>) | 372 |
| TCVRP (<i>Capacitated VRP on Trees</i>) | 49 |
| TTRP (<i>Truck and Trailer routing problem</i>) | 74 |
| VRPPD (<i>VRP with Pick up and delivery</i>) | 236 |
| VRPPC (<i>VRP with private fleet and common carrier</i>) | 15 |
| VSRP (<i>Vehicle Scheduling routing problem</i>) | 74 |
| CLRP (<i>Capacitated location routing problem</i>) | 235 |

Tabla 2. Resultados variantes VRP.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Se definen entonces, en dichas variantes, sus aplicaciones más generales y su topología más usual mediante graficas explicativas.
- Se identifica la formulación matemática para el Problema de localización y ruteo con flota propia y subcontratada (CLRPPC), *Capacitated Location Routing Problem With Private Fleet And Common Carrier*. Dado que es un modelo matemático flexible que puede ser usado para resolver diferentes variantes del problema de ruteo. Este modelo puede ser usado como base para plantear versiones abiertas, cerradas y mixtas (rutas abiertas y cerradas) dentro de la temática del VRP (Toro E. M., 2017)
- La revisión explica los inicios del VRP, desde su antecesor, el TSP, pero enfatiza en la literatura de los años recientes y que sigue en vigencia hasta el día de hoy, demostrando así, la necesidad que tienen los centros urbanos y logísticos de ahondar en el tema de transporte de bienes y personas.
- Se ratifica finalmente la importancia que tiene el ruteo vehicular para las sociedades modernas, y el gran espectro de estudio que tiene el problema de ruteo vehicular con la gran cantidad de variables que se pueden modelar en un caso determinado de transporte. Con este trabajo se logra identificar nuevas líneas de investigación basado en las dificultades que se han encontrado en la revisión, como variantes que no se han estudiado a fondo y que representan una necesidad para la logística urbana.

En la revisión se observa que los primeros intentos de solución del problema incluyen modelos matemáticos resueltos de forma exacta pero en la medida en que se pretende representar la operación real, el tamaño de los problemas crece exponencialmente lo que hace necesario el uso de herramientas que entreguen soluciones en tiempos computacionales más cortos, como las estrategias heurísticas y metaheurísticas. Otra área en la que se está explorando es en las matheurísticas con el objetivo de mejorar la calidad de las soluciones y el desempeño de las metodologías de solución.

Estudiar el problema de transporte es de relevancia debido a su alto impacto en el costo final de los productos y/o servicios que se consumen en la vida diaria. También es claro que los costos asociados al transporte de última milla son los que más impactan en el costo total de transporte que se le debe incluir al valor final de los productos. Por tanto la logística de última milla significa un reto para el sector logístico, especialmente porque necesita encontrar innovadoras formas de entregar en menos tiempo y más económico. Los estudios previos del VRP resultan ser una base interesante para mejorar la gestión, además también se involucran aspectos tecnológicos como ubicación de paquetes con GPS o entregas a los usuarios de sus mercancías a través de drones, con el objetivo de evitar el alto tráfico de las ciudades.

Los algoritmos heurísticos constructivos han tenido una mayor aplicación práctica como soluciones iniciales para el CLRP. En general dichos algoritmos permiten obtener soluciones iniciales factibles en tiempos de cómputo reducido, las cuales son susceptibles de ser mejoradas mediante algoritmos exactos, algoritmos de trayectoria o algoritmos poblacionales (Escobar J. W., 2015).

El uso de clústeres de clientes para resolver problemas de ruteo de vehículos con varios depósitos es un área prominente de investigación, debido a que es posible obtener soluciones rápidas que pueden ser mejoradas mediante algún procedimiento de búsqueda local. De esta manera se pueden integrar las metodologías de clúster en un esquema interactivo (Escobar J. W., 2015).

Varios algoritmos exactos han sido propuestos para el CLRP en los últimos años. Los algoritmos más exitosos han extendido las metodologías propuestas para el VRP al CLRP. A pesar de lo anterior, dichos algoritmos han sido capaces de probar optimalidad en instancias hasta de tamaño mediano (máximo 150 clientes), razón por la cual se ha dado paso a un desarrollo enorme de heurísticas y metaheurísticas para el CLRP. Se propone entonces, varias líneas de investigación y trabajos futuros, estos son: Desarrollo de metaheurísticas unificadas. El desarrollo de metodologías unificadas y robustas permitirá resolver la problemática de manera adecuada, evitando la proliferación de algoritmos metaheurísticos con características similares. Los algoritmos diseñados deberían ser eficientes para la solución de instancias de gran tamaño; Estrategias de paralelismo. Dichas estrategias podrían permitir una mejor exploración del espacio de solución dentro de tiempos computacionales razonables. En particular, se podría extender algoritmos metaheurísticos paralelos propuestos para diversas variantes del VRP (Escobar J. W., 2015)

El aspecto ambiental debe ser considerado en la nueva propuesta de cualquier variante de VRP, porque la sostenibilidad de las organizaciones debe considerarse al desarrollar sus operaciones. La programación multiobjetivo se propone como una alternativa interesante para ser implementado debido a la necesidad de tener en cuenta la reducción del impacto al medio ambiente (Toro, Escobar, & Granada, 2016).

Algunas variantes del VRP, han sido poco estudiadas, según se evidencia en las estadísticas de *Scopus*, estas, de gran importancia para logística urbana, lo que abre las puertas a nuevas líneas de investigación.

BIBLIOGRAFÍA.

- Amaya, C. L. (2007). In *The capacitated arc routing problem with refill points. Oper. Res. Lett.*, 35 (pp. 45-53).
- Araque, J., Hall, L., & Magnanti, T. (1990). Capacitated trees capacitated routing and associated polyhedral. In *Technical report*. Belgium: University of Louvain La neuve disponible en <http://hdl.handle.net/1721.1/5194>.
- Arbelaitz, O., & Rodríguez, C. (2004). Comparison of systems based on evolutionary search and simulated annealing to solve VRPTW problem. In *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, Vol. 4 (pp. 27-39).
- Archetti, C., Savelsbergh, M., & Speranza, M. (2006). Worst-case analysis for Split delivery vehicle routing problems. In *Transportation Science* (pp. 226-234).
- Arias, C. (2015). Análisis e implementación del algoritmo genético de chubeasley para resolver el problema del agente viajero (TSP) y su variante, El problema de rutas de vehículo. In *tesis de grado, UTP, disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5384/0063823A696.pdf?sequence=1&isAllowed=y>* (pp. 11-19). PEREIRA.
- Ayala Rodríguez, A., & González Butrón, E. (2001). Asignación de rutas de vehículos para un sistema de recolección de residuos sólidos en la acera. In *Revista de Ingeniería - Universidad de Los Andes*, No. 13 (pp. 5-11).
- Azi, N., Gendreau, M., & Potvin, J. (2010). An Adaptive large neighborhood search for a Vehicle Routing Problem with Multiple Trips. In *CIRRELT*.
- Azi, N., Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (2010). An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles. In *European Journal of Operational Research* Vol. 202, No. 3 (pp. 756-763).
- Azi, N., Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (2014). An adaptive large neighborhood search for a vehicle routing problem. In *Computers & Operations Research* 41 (pp. 167–173).
- Baker, B. y. (2003). A genetic algorithm for the vehicle routing problem. In *Computers and Operational Research* 30 (pp. 787–800).
- Baldacci, R. a. (2004). A Unified Exact Algorithm For The CVRP Base On A Two-Commodity Network Flow Formulation. In *OR* (pp. 52, 723-738).
- Baldacci, R. B. (2010). Some application of the generalized vehicle routing problem. In *Journal of the operational research society*, 61 (pp. 1072-1077).
- Baldacci, R. T. (2010). Exact Algorithms For Routing Problems Under Vehicle Capacity Constraints. In *Annals of Operations Research*, 175(1) (pp. 213-245).
- Baldacci, R., Hadjiconstantinou, E., & Mingozzi, A. (2004). An exact algorithm for the capacitated vehicle routing problem base on a two-commodity network Wow formulation. In *Operations Research* (pp. 52:723–738). doi: <http://dx.doi.org/10.1287/opre.1040.0111>.
- Baldacci, R., Bartolini, E., Mingozzi, A., & Vallet, A. (2011). An exact algorithm for the period routing problem. In *Operations Research* 59(1) (pp. 228–241). doi: 10.1287/opre.1100.0875.

- Balinzki, M., & Quandt, R. (1964). On an Integer Program for a Delivery Problem. In *Operational Research*, Vol. 12, No. 2 (pp. 300-304). Mencionado por Prawda, J. (2002).
- Barbarosoglu, G. y. (1999). A tabu search algorithm for the vehicle routing problem. In *Computers and Operations Research* 26 (pp. 255–270).
- Beasley, J. (1983). Route first - cluster second methods for vehicle routing. *Omega* 11.
- Bektas, I. a. (2011). The Pollution-Routing Problem. In *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8) (pp. 1232-1250.).
- Belgina, O., Karaoglanb, I., & Altiparmakc, F. (2016). Two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Mathematical model and heuristic approach. In *Computers & Industrial Engineering*, Volume 115 (pp. 1-16).
- Belhaiza, S., Hansen, P., & Laporte, G. (2014). A hybrid variable neighborhood tabu search heuristic for the vehicle routing problem with multiple time windows. In *Computers & Operations Research*, Volume 52, Part B (pp. 269-281).
- Benjelloun A, C. T. (2009). Trends, challenges, and perspectives in city logistics. In *Université du Québec, Montréal, Canada, Disponible en:* https://www.researchgate.net/publication/266270528_Trends_challenges_and_perspectives_in_city_logistics.
- Bertsimas, D. (1992). A vehicle routing problem with stochastic demand. In *Operations Research*, 40 (pp. 574-585).
- Bianchi, L., Birattari, M., Chiarandin, M., Manfrin, M., & Mastrolilli, M. (2004). Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. In *Lecture Notes in Computer Science*, Vol 3242 (pp. 450-460).
- Bodin, L. (1974). A taxonomic Structure for Vehicle Routing and Scheduling Problems. In *Computers and Urban Society*, 1 (pp. 11-29).
- Bodin, L., & Golden, B. (1981). Classification in Vehicle Routing. In *Networks*, 11 (pp. 97-108).
- Bolanos, R. T.-O. (2016). A population-based algorithm for the multi travelling salesman problem. In *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(2), doi: 10.5267/j.ijiec.2015.10.005. URL <http://growingscience.com/beta/ijiec/2137-a-population-based-algorithm-for-the-multi-travel> 132 (pp. 245–256).
- Bräysy, O., & Gendreau, M. (2005). Vehicle Routing Problem with time windows, Part II. In *Metaheuristics. Journal Transportation Science*, 39(1) (pp. 119-139).
- Breedam, A. V. (1995). Improvement heuristics for the vehicle routing problem based on simulated annealing. In *European Journal of Operational Research* 86 (pp. 480–490).
- Cacchiani, V., Hemmelmayr, V., & Tricoire, F. (2014). A Set-Covering Based Heuristic Algorithm For The Periodic VRP. In *Discrete Applied Mathematics*, 163(1) (pp. 53-64).
- Caramia, M. a. (2010). A Heuristic Approach For the truck and trailer routing problem. In *JORS*, 61 (pp. 1168-1180).
- Chandran, B. &. (2007). Modeling and Solving the Capacitated Vehicle Routing Problem on Trees.

- Chen, J. F. (2006). Vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pickups. In *Journal of the Operational Research Society*, 57(5) (pp. 579-587).
- Chou, S.-W. L.-Y. (2009). Solving the truck and trailer routing problem based on a simulated annealing heuristic. In *Computers & Operations Research*, Volume 36, Issue 5, May 2009 (pp. 1683-1692).
- Christofides, N. M. (1979). The vehicle routing problem. In *Combinatorial Optimization* (pp. 315–338).
- Clarke, G. y. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number. In *Operations Research* 47 (pp. 568–581).
- Contardo Vera, C. A. (2005). Formulación y solución de un problema de ruteo de vehículos con demanda variable en tiempo real, trasbordos y ventanas de tiempo. In *Memoria para optar al título de ingeniero civil matemático, Departamento de Ingeniería Matemática, Universidad de Chile*. Santiago de Chile, Chile.
- Cordeau, J. (2006). A Branch-And-Cut Algorithm For The Dial-a ride problem. In *OR*, 54(3) (pp. 573-586).
- Cordeau, J. a. (2003). The Dial-a-ride problem (DARP): Variants, Modeling Issues And Algorithms. In *4OR* (pp. 1, 89- 101.).
- Cordeau, J. L. (n.d.).
- Corona, J. A. (2005). Hiperheurísticas a través de Programación Genética para la Resolución de Problemas de Ruteo de Vehículos. In E. Única. <https://repositorio.itesm.mx/ortec/handle/11285/567250>.
- Crainic, T. P. (2010). Two-Echelon VRP: A Satellite Location Analisis. In *PROCEDIA Social and Behavioral Sciencies*, 2(3) (pp. 5944-955).
- Cruz, E., Restrepo, J., & Medina, P. (2007). Un problema logístico de ruteo de vehículos y una solución con solver Excel. In *Scientia et Technica – Universidad Tecnológica de Pereira, Vol. 13, No. 37* (pp. 369-372).
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. In *Management science* (pp. 80-91). <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>.
- Dantzig, G. F. (1954). Solution of a large-scale traveling-salesman problem. In *Operations Research* 2 (pp. 393-410).
- Daza, J. M., Montoya, J. R., & Narducci, F. (2009). Resolución de problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases. *Eia*, 1(12).
- Despaux, F. B. (2016). Multi-Trip Vehicle Routing Problem with Time Windows and Heterogeneous Fleet. In *International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications*. ISSN 2150-7988 Volume 8 (pp. 355–363).
- Díaz, D. (2007). The VRP Web, Collaboration between AUREN and the Languages and Computation Sciences department of the University of Málaga by Bernabé. *consultada en abril de 2010, disponible en <http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP/>*.
- Díaz, D. (2007). The VRP Web, Collaboration between AUREN and the Languages and Computation Sciences department of the University of Málaga by Bernabé. última

- actualización: marzo de 2007, consultada en abril de 2010, disponible en <http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP/>.
- Doerner, K. (2001). Savings Ants for the Vehicle Routing Problem. In *Lecture Notes in Computer Science – Applications of Evolutionary Computing*, (pp. 73-109).
- Donati, A. M. (2008). Time Dependent VRP With A Multi Ant Colony System. In *EJOR*, 185(3) (pp. 1174-1191).
- Dror, M., & Trudeau, P. (1990). Split Delivery Routing.
- Ehmke, J. (2012). Integration of Information and Optimization Models for Routing in City Logistics. In *International Series in Operations Research & Management Science 177*, Springer Science+Business Media New York, DOI: http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloadaddocument/9781461436270-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1330452-p174308669 (p. 9 a 20).
- Eilon, S. W.-G. (1971). Distribution management: Mathematical modelling and practical analysis. In NY: *Hafner Publication Co.*
- Eksioglu B, V. A. (2009). Survey: The vehicle routing problem: A taxonomic review. In *Journal computers and Industrial Engineering*, 57(4), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2009.05.009>. (pp. 1472–1483).
- elsevier, A. c. (2004). The world of scientific research is more demanding than ever before. In *disponible en https://www.elsevier.com/solutions/scopus*.
- Erdogan, S. a.-H. (2012). A Green Vehicle Routing Problem. In *Transportation Research Part E*, 48(1) (pp. 100-114.).
- Escobar, J. L. (2013). A two-phase hybrid algorithm for the capacitated location-routing problem. In *COR*, 40(1) (pp. 70-79).
- Escobar, J. W. (2015). Problema de Localización y Ruteo con Restricciones de Capacidad: Revisión de la Literatura. In *Facultad de Ingeniería*, 24(39) (pp. 85-98).
- Euchi, J. C. (2011). New Evolutionary Algorithm Based On 2-Opt Local Search To Solve The Vehicle Routing Problem with Private fleet and common carrier. In *International Journal of Applied Metaheuristic*, 2(1) (pp. 58-82).
- Fischetti, P., Toth, P., & Vigo, D. (1994). Branch and bound for capacitated arc routing problem directed graphs. In *Operational Research* (pp. 42:846–859). doi: <http://www.jstor.org/stable/171544>.
- Flood, M. (1956). The Traveling-Salesman Problem. In *Oper. Res.* 4 (pp. 61-75).
- Frederick, H., & Gerald, L. (2010). Introducción a la Investigación de Operaciones. In *Mc Graw Hill*, novena edición.
- Fukasawa, R. L. (2004). Robust branch-and-cut-and-price for the capacitated vehicle routing problem. In *Lecture Notes in Computer Science*, 3064 (pp. 1-15).
- Galindres-Guancha, L. E.-O. (2018). Multi-objective MDVRP solution considering route balance and cost using the ILS metaheuristic. In *International Journal of Industrial Engineering Computations* 9.1 (pp. 33-46).
- Garvin, W. W., Crandall, H. W., & John, J. B. (1957). Aplicaciones of Linear Programming in the Oil Industry. In *Management Science*, Vol.3 (p. 407). Mencionado por Prawda, J. (2002).
- Gendreau, M. H. (1992). New insertion and post optimization procedures for the traveling salesman problem. In *Operations Research* 40 (pp. 1086–1094).

- Ghiani, G. a. (2000). An Efficient Transformation Of The Generalized Vehicle Routing Problem. In *EJOR*, 122(1) (pp. 11-17).
- Ghiani, G. G. (2003). Real-Time Vehicle Routing: Solution Concepts, Algorithms And Parallel Computing Strategies. In *EJOR*, 151(1) (pp. 1-11).
- Giagli, G. M. (2004). Minimizing Logistics Risk Through RTVRP And Mobile Technologies: Research. In *IJPD & LM*, 34(9) (pp. 749-764).
- Golden, B., Raghavan, S., & Wasil, E. (2008). The vehicle routing problem: latest advances and new challenges. Springer, New York.
- Granada-Echeverri, M. E. (2019). A mixed integer linear programming formulation for the vehicle routing problem with backhauls. In *International Journal of Industrial Engineering Computations* 10.2 (pp. 295-308).
- Gupta, D. (2002). Tabu search for vehicle routing problem. In *Intern. J. Computer Math*, Vol. 79, No. 6 (pp. 693-701).
- Hemmelmayr, V., & Doerner, K. (2009). A variable neighborhood search heuristic for periodical vehicle routing problems. In *EJOR*, 195(3) (pp. 791-802).
- Jorgensen, M. a. (2006). Solving Dial-a ride problem using Genetic Algorithm. In *JOR Society*, 58 (pp. 1321-1331).
- Kara, I. (2010). On the Miller-Tucker-Zemlin Based Formulations for the Distance-Constrained Capacitated Vehicle Routing Problem. In *AIP Conference Proceedings*, 1309 (pp. 551-561).
- Kara, I. (2011). Arc Based Integer Programming Formulations For Distance-Constrained Capacitated Vehicle Routing Problem. In *LINDI.3rd IEEE International Symposium on IEEE*.
- Kenny Qili Zhu, & K.-L. (2000). A reactive method for real time dynamic vehicle routing problem. In *Proceedings 12th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence. ICTAI 2000*. doi:10.1109/tai.2000.889865.
- Konstantinidis, A., Savvas, P., & Char. (2014). Adaptive Evolutionary Algorithm for a Multi-Objective VRP. In *International Journal on Engineering Intelligent Systems vol 22* (pp. 145-162).
- Koskosidis, Y. P. (1982). An optimization-based heuristic for vehicle routing and scheduling. In *Transportation Science*, 26(2) (pp. 69-85).
- Kumar, S. a. (2012). A survey on the Vehicle Routing Problem and its variants. In *Intelligent Information Management*, 4 (pp. 66-74).
- Kwon, Y., Choi, Y., & Lee, D. (2013). Heterogeneous fixed fleet vehicle routing considering carbon emission. In *Transportation Research Part D*, 23 (pp. 81-89).
- Labbé, M. L. (1991). Capacitated Vehicle Routing Problems on trees. In *OR*, 39 (pp. 616-622).
- Lacomme, P. P. (2001). A Genetic Algorithm for the Capacitated arc routing problem and its extensions. In *In AEC, E.J.W. Boers (Ed.), Lecture Notes in Computer Sciences, Springer* (pp. 2037, 473-483).
- Laporte, G., & Nobert, Y. (1987). Exact algorithms for the vehicle routing problem.
- Laporte, G. (1991). The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, Vol. 59, pp 345-358.

- Laporte, G. (1991). The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. In *European Journal of Operational Research*, Vol. 59 (pp. 345-358).
- Laporte, G., Gendreau, M., & Hertz, A. (1998). An approximation algorithm for the traveling salesman problem with time windows. In *Institute for Operation Research and de Management Science – Operations Research*, Vol. 45, No. 4 (pp. 639-641).
- Laporte, G., Hertz, A., & Mittaz, M. (2000). A tabu search heuristic for the capacited arc routing problem. In *nstitute for Operation Research and the Management Science – Operations Research*, Vol. 48, No. 11 (pp. 129-135).
- Laporte, G., Reanud, J., & Boctor, F. (1996). An improved petal heuristic for the vheicle routeing problem. In *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 47, No. 2 (pp. 329- 336).
- Lau, C., Sim, M., & Teo, M. (2003). Vehicle routing problem with time windows and limited number of vehicles. In *European Journal of Operational Research*, 148 (pp. 3,559-569).
- Li, F. G. (2007). The open vehicle routing problem : algorithms large-scale test problem, and computational results. In *Computers & Operations Research*, 34 (pp. 2918-2930).
- Li, X. L. (2012). A multistart adaptative memory based tabu search algorithm for the heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem. In *Experts Systems with Application*, 39 (pp. 365-374).
- Lima, C., Goldberg, M., & Goldberg, E. (2004). A Memetic Algorithm for the HFVRP. In *Electronic Notes in Discrete Math*, 18 (pp. 171-176).
- Malandraki, C. a. (1992). Time Dependent Vehicle Routin Problem: Formulations, Solution Algorithms And Computational Experiments. In *Transportation Sciencie*, 26(3) (pp. 185- 200).
- Martinelli, R. P. (2011). Improved bounds for large scale capacitated arc routing problem. In *Technical report MCC14/11, Dep. de Informática, (PUC-Rio), Brazil*.
- Mbaraga, P. L. (1999). Two exact algorithms for the vehicle routing problem on trees. In *Naval Research Logistics*, 46 (pp. 75-89).
- Medina, L. B. (2011). Una Revisión al Estado del Arte del Problema de Ruteo de Vehículos: Evolución Histórica Y Métodos De Solución. In *Ingeniería*, 16(2), Retrieved from <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/3832> (pp. 35–55).
- Miller, C., Tucker, A., & Zemlin, R. (1960). Integer Programming formulation of traveling salesman problems. In *Journal of Association for Computing Machinery*. 7 (pp. 326-329).
- Miller, C., Tucker, A., & Zemlin, R. (1960). Integer programming formulation of traveling salesman problems. *Journal of the ACM* No. 7, 326-329.
- Minocha, B., Tripathi, S., & Mohan, C. S. (2011). Vehicle Routing and scheduling problems using hybrid genetic algorithm. In *Electronics Computer Technology (ICECT), 2011 3rd International*.
- Mole, R. H. (1976). A sequential route-building algorithm employing. In *Operation Research Quarterly* 11 (pp. 503–511).

- Montoya Torres, J. R.-P. (2015). A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. In *Computers & Industrial Engineering*, 79 (pp. 115–129).
- Mourkousis, G., Protonotarios, M., & Varvarigou, T. (2003). Application of genetic algorithm to a large-scale multiple-constraint vehicle routing problem. In *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, Vol. 3, No. 1, (pp. 1-21).
- Naddef, D., & Rinaldi, G. (2002). Branch-and-cut algorithms for the capacitated vehicle routing problem. In M. o. Applications.
- Nagy, G. a. (2003). Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pick ups and deliveries. In *Working Paper no. 42, Canterbury Business School*.
- Naud, M. a. (2009). Tabu Search with ejections chains for Vehicle Routing Problem with Private Fleet and Common Carrier. In *CIRRELT-2009-50*.
- OICA. (2017). <http://www.oica.net>. Retrieved Agosto 2018, from <http://www.oica.net/category/production-statistics/2017-statistics/>
- Olivera, A. (2004). *Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos*. Retrieved from reporte de investigación, Instituto de Computación – Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay: <http://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0408.pdf>.
- Olivera, A., & Viera, O. (2007). Adaptive memory programming for the Vehicle routing problem with multiple trips. In *Computers and Operation Research*, Vol. 34 (pp. 28-47).
- Ombuki-Berman, B., & Hanshar, F. (2009). Using GA for multidepot vehicle routing. In Bio-Inspired Algorithms for the VRP. In *Ed: Springer - Studies in Computational Int.* (pp. 161, 77-99).
- Or, I. (1976). Traveling salesman-type combinatorial optimization problems and their relation to the logistics of regional blood banking. In *Northwestern University - Evanston, IL: Ph.D. thesis*.
- Osman, I. (1993). Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for. In *Annals of Operations Research* 41 (pp. 421–451).
- Ospina Toro, D. T.-R. (2018). SOLUCIÓN DEL MDVRP USANDO EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA LOCAL ITERADA. . In *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, 1(31).
- Özyurt, Z., Aksen, D., & Aras, N. (2006). OVRP with time deadlines: solution methods and applications. In *OR Proceedings 2005. Springer Berlin Heidelberg* (pp. 73-78).
- Paraskevopoulos, D., Repoussis, P., Tarantilis, C., Ioannou, G., & Prastacos, G. (2008). A Reactive VNSTS For The HFVRP With Time Windows. In *Journal of Heuristics*, 14(5) (pp. 425-455).
- Perboli, G. a. (2010). New Families Of Valid Inequalities For The Two-Echelon Vehicle Routing Problem. In *Electronic Notes in Discrete Mathematics* (pp. 36, 639-646).
- Pereira, F. y. (2002). A new genetic representation for the vehicle routing problem. In *Proceedings of the 13th Conference on Artificial Intelligence and Cognitive Science* (pp. 95–102).

- Pessoa, A. U. (2008). The VRP: Latest advances and New Challenges. In *Robust Branch-Cut-Price Algorithms for VRP*. Springer (pp. 297-325).
- Petch , R., & Salhi, S. (2007). A GA Based Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Multiple Trips. In *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms Vol. 6, No. 4* (pp. 591-613).
- Pop, P. P. (2008). Solving The Generalized Vehicle Routing Problem with an ACS-based Algorithm. In *AIP Conference Proceedings: BICS, 1117(1)* (pp. 157-162).
- Prins, C. P. (2007). Solving the CLRP by a Coop. Lagrangean Relaxation-Granular Heuristic. In *Transportation Science, 41(4)* (pp. 470-483).
- Prodhon , C., & Prins, C. (2014). A survey of recent research on location-routing problems. In *European Journal of Operational Research, vol. 238, issue 1* (pp. 1-17).
- Prodhon , C., & Prins, C. (2014). A survey of recent research on location-routing problems. In *European Journal Of Operational Research* (pp. 238:1–17).
- Qili Zhu, K., & Ong, K.-L. (2000). A Reactive Method for Real Time Dynamic Vehicle Routing Problem. In *Dept. Computer Science, National University of Singapore, Singapore 119260*.
- Qiu, L. H. (2002). Scheduling and routing algorithms for AGVs: a Survey. In *International Journal Production Research, 40(3)* (pp. 745,760).
- Rego, C. (1998). A subpath ejection method for the vehicle routing problem. In *Management Science 44* (pp. 1447–1459).
- Reisman, A. (1992). Management Science Knowledge: Its Creation. In *Generalization, and Consolidation. Greenwood P.*
- Renaud, J., Laporte, G., & Boctor, F. (1996). A Tabu Search heuristic for the Multi Depot Vehicle Routing Problem. In *COR, 23* (pp. 229-235.).
- Rendón, R. A. (2015). Técnicas Heurísticas y Metaheurísticas. Universidad Tecnológica de Pereira. Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión. In *Ingenierías Eléctrica, Electrónica, Física y Ciencias de la Computación*.
- Restrepo, J. H., & Medina, P. D. (2007). Un problema logístico de ruteo de vehículos y una solución con la heurística R. In *Scientia et Technica – Universidad Tecnológica de Pereira, Vol. 14, No 39* (pp. 229-234).
- Restrepo, J. H., Medina, P. D., & Cruz, E. A. (2008). Un problema logístico de programación de vehículos con ventanas de tiempo. *Scientia et Technica – Universidad Tecnológica de Pereira vol. 14 No 39*.
- Rocha, L. B. (2011). Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. *Ingeniería, 35-55*.
- S.O. Krumke, W. d.-S. (2006). On minimizing the maximum flow time in the online dial-a-ride problem. In *Springer, Berlin/Heidelberg 3879*,.
- Salhi, S., & Sari, M. (1997). A multi-level composite heuristic for the multidepot vehicle fleet mix problem. In *EJOR* (pp. 103, 95-112).
- Sathyanarayanan, S., & Suresh Joseph, K. (2014). A survey on stochastic vehicle routing problem. In *S.A.Engineering College, Chennai, Tamil Nadu, India*.

- Sbihi, A. a. (2007). The relationship between VRP and Scheduling and Green Logistics - A Literature Survey. Working paper. In *The Department of Management Science Lancaster University Management School, UK*.
- Scopus. (11/7/2018). <https://www.scopus.com>.
- Shen, Z., Ordóñez, F., & Dessouky, M. (2009). The stochastic vehicle routing problem for minimum unmet demand. In *chap. IV. Luna Azul ISSN 1909-2474 No. 42, enero - junio 2016* ©Universidad de Caldas 385 Springer Optimization and Its Applications. Springer US, Boston, MA (pp. 349-37).
- Solomon, M. (1987). Algorithms For Vehicle Scheduling Routing Problem With Time Windows. In *Operations Research*, 35(2) (pp. 354-265).
- Sophie N. Parragh, K. F. (2006). A survey on pickup and delivery problems, Part II: Transportation between pickup and delivery locations. In *Received: 30 June 2006 / Accepted: 17 April 2008 / Published online: 16 May 2008*.
- Sripriya, J., Ramalingam, A., & Rajes, K. (2015). A hybrid Genetic Algorithm for Vehicle Routing Problem with Time Windows. In *International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)* (pp. 1-4).
- Subramanian, A. D. (1899-1911). A parallel heuristic for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and delivery. In *Computers & Operations Research*, 37(11).
- Taillard, E. D. (1993). Parallel iterative search methods for vehicle routing problems. In *Networks* 23 (pp. 661–673).
- Thangiah, S., Vinayagamoorthy, R., & Gubbi, A. (1993). Vehicle routing and time deadlines using genetic and local algorithms. In *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms* (pp. 506-515).
- Thompson, P. M. (1993). Cyclic transfer algorithms for multivehicle routing and scheduling problems. In *Oper. Res.*, 41 (pp. 935-946).
- Tillman, F. (1969). The multiple terminal delivery problem with probabilistic demands. In *Transportation Science*, no. 3 (pp. 192–204).
- Tillman, F. A. (1969). The multiple terminal delivery problem with probabilistic demands. In *Transportation Science*, 3(3) (pp. 192-204).
- Toro Ocampo, E., Domínguez Castaño, A., & Escobar Zuluaga, A. (2016). Desempeño de las técnicas de agrupamiento para resolver el problema de ruteo con múltiples depósitos. In *Tecnológicas*, 19(36) (pp. 49-62.).
- Toro, E. (2016). Franco, Baquero, J.F.; Galle, Modelo matemático para resolver el problema de localización y ruteo con restricciones de capacidad considerando flota propia y subcontratada. In *Ingeniería, investigación y tecnología*, 17(3) (pp. 357-369).
- Toro, E. M. (2016). Solución del problema de localización y ruteo usando un modelo matemático Wexible y considerando efectos ambientales (Doctoral dissertation. In *Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingenierías Eléctrica, Electrónica, Física y Ciencias de la Computación, Facultad de Ingeniería Mecánica y Facultad de Ingeniería Industrial. Doctorado en Ingeniería*. Pereira.
- Toro, E. M. (2017). A multi-objective model for the green capacitated location-routing problem considering environmental impact. In *Computers & Industrial Engineering* 110 (pp. 114-125).

- Toro, E., Escobar, A., & Granada, M. (2016). Literature Review on the Vehicle Routing Problem in the Green Transportation Context. *Luna Azul*, ISSN 19092474. doi: 10.17151/luaz.2016.42.21.
- Toth, P. y. (2003). The granular tabu search and its application to the vehicle routing problem. In *INFORMS Journal of Computing* 15 (pp. 333–346).
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). The Vehicle Routing Problem. Philadelphia, USA: Society of Industrial and Applied Mathematics (SIAM) monographs on discrete mathematics and applications.
- Vidal, T. C. (2013). Heuristics for multi-attribute vehicle routing problems: a survey and synthesis. In *EJOR*, 231(1) (pp. 1-21).
- Vidal, T. C. (2014). Implicit depot assignments and rotations in vehicle routing heuristics. In *European Journal of Operational Research*, 237(1) (pp. 15-28.).
- Vigo, D. (1996). Heuristic Algorithm For The Arc Capacitated Vehicle Routing Problem. In *EJOR* (pp. 89, 108-126).
- Villegas, J. G. (2010). GRASP/VND and multi-start evolutionary local search for the single TTPRP with satellite depots. In *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(5) (pp. 780-794).
- Wade, A., & Salhi, S. (2003). An ant system algorithm for the mixed vehicle routing problem with backhauls. In *In Resende, M. G. C and de Sousa, J. P. (Eds.): Metaheuristics: Computer Decision-Making Chapter 33 Kluwer* (pp. 699-719).
- Wilck IV, J., & Cavalier, T. (2012). Construction Heuristic for the Split Delivery. In *American Journal of Operations Research* 2. disponible en <http://dx.doi.org/10.4236/ajor.2012.22018> (pp. 153-162).
- Wren, A. y. (1972). Computer scheduling of vehicles from one or more depots to a number of delivery points. In *Operational Research Quarterly* 23 (pp. 333–344).
- Xiao, Y. Z. (2012). Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem. In *Computers and Operations Research*, 39(7) (pp. 1419-1431).
- Yepes Piqueras, V. (2002). Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW. *tesis doctoral, Departamento de ingeniería de la construcción y Proyectos de ingeniería civil, Escuela técnica superior de ingenieros de caminos canales y puertos Universidad de Valencia*.
- Yeun, C. L. (2008). Vehicle routing problem: models and solutions. In *Journal of Quality Measurement and Analysis*. 4(1) (pp. 205-218).
- Zhang, D. W. (2018). Joint optimization of green vehicle scheduling and routing problem with time-varying speeds. In *PloS one*, 13(2), e0192000.

